

## **МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКОЙ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ГУСЕНИЧНОЙ ПЛАТФОРМЫ ПО ЗАНОСУ**

### **Введение.**

Подвижность является одной из главных тактико-технических характеристик объекта бронетанковой техники (ОБТТ). Показателем подвижности является средняя скорость движения, которая в значительной степени зависит от совершенства конструкции трансмиссии и механизма поворота гусеничной машины. Движение гусеничных машин характеризуется тем, что (30...70)% пути машина находится в состоянии поворота. При этом движение объектов бронетанковой техники сопровождается непрерывно изменяющимися внешними воздействиями, что приводит к постоянному изменению скорости.

Известно, что возникновение опасности заноса танка накладывает значительные ограничения на скорость его движения при повороте, что особенно критично на грунтах со слабыми сцепными свойствами. Таким образом, каждый механик-водитель, используя накопленный опыт, должен “чувствовать” объект управления в процессе движения, постоянно анализировать часто изменяющиеся дорожные условия, выбирать соответствующую скорость движения и предугадывать моменты, при которых для данных дорожных условий возможно возникновение заноса танка, реагируя на это снижением скорости движения.

На современном этапе своего развития ОБТТ являются сложными человекоуправляемыми техническими системами, которые снабжены значительным количеством вспомогательных систем управления. Данные системы помогают операторам реализовывать основные боевые свойства танка с максимально высокими показателями. Такие системы получили название SEP (Systems Enhancement Package) – системы повышения качества платформы.

### **Постановка проблемы.**

Применительно к процессу неустановившегося движения гусеничной платформы при повороте возникла необходимость в определении условий, при которых возможно возникновение заноса, для выявления приемлемых режимов криволинейного движения гусеничной платформы с предельно высокими скоростями для заданных дорожных условий при создании SEP – системы.

### **Анализ последних достижений и публикаций.**

Для адекватного описания процесса криволинейного движения гусеничной платформы необходимы характеристики взаимодействия движителя с грунтом. Проведенный анализ литературы показывает, что в настоящее время при моделировании процесса криволинейного движения гусеничной платформы, в основном используются данные в виде дискретных значений показателей, численные значения которых взяты из источников [1, 2], а имеющиеся экспериментальные данные не позволяют построить общую аналитическую зависимость между кинематическими параметрами и характеристиками дорожно – грунтовых условий.

### **Цель статьи.**

Целью статьи является: 1. Разработка методики, которая позволяет определять минимальный радиус поворота гусеничной платформы до значения которого, для заданных скорости движения и дорожно-грунтовых условий, занос не возникает.

2. Определить характерные области траекторий движения гусеничной платформы с заносом, с произвольным радиусом и область, недоступную для поворота.

**Основной материал.**

Прежде чем приступить к параметрическим исследованиям математической модели движения платформы следует определить начальные условия и условия однозначности.

Движение гусеничной платформы на различных передачах вперед осуществляется в соответствующих диапазонах скоростей. При этом поворот на каждой из передач осуществляется в пределах до фиксированного радиуса. Поэтому, для обеспечения возможности во-первых, сравнения полученных результатов с объективными характеристиками, а во-вторых, исходя из наличия полноты информации, при моделировании взяты показатели танка Т-64А. При задании значений составляющих начальной скорости  $V_0$  исходили из соотношения:

$$V_0 = \sqrt{V_{Ox}^2 + V_{Oy}^2} ; \quad (1)$$

При этом в начальный момент времени платформа движется прямолинейно.

Схема сил и моментов действующих на гусеничную платформу в процессе поворота представлена на рис. 1.

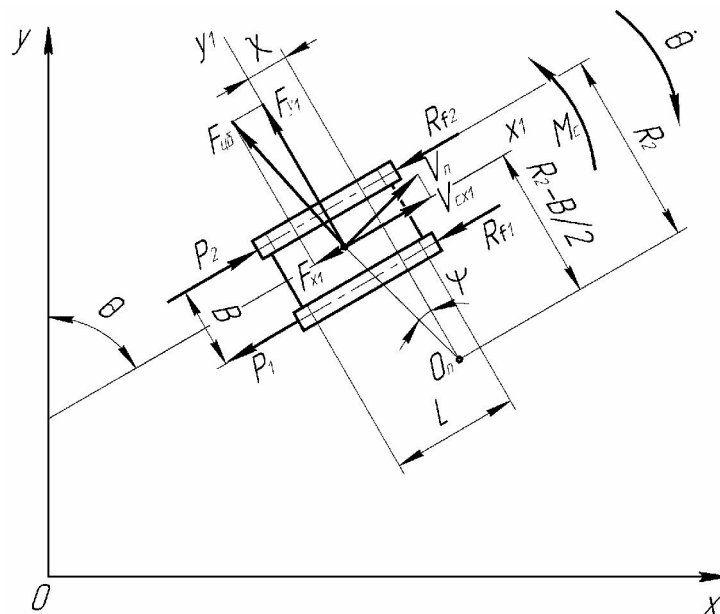


Рис.1. Схема сил и моментов, действующих на гусеничную платформу

где:  $P_2$  - сила тяги на забегающей гусенице, Н;  $P_1$  - сила торможения на отстающей гусенице, Н;  $R_2$  – радиус поворота забегающей гусеницы, м;  $B$  – ширина колеи, м;  $R_{f1}, R_{f2}$  – сопротивление поступательному движению отстающей и забегающей гусениц соответственно, Н;  $F_{y0}$  – центробежная сила, Н;  $F_{y1}$  – поперечная составляющая центробежной силы, Н;  $F_{x1}$  – продольная составляющая центробежной силы, Н;  $V_n$  – скорость движения гусеничной платформы, м/с;  $\chi$  – относительная величина смещения центра поворота в продольном направлении, м;  $L$  – длина опорной поверхности гусениц, м;  $\Theta$  – курсовой угол, рад;  $\dot{\Theta}$  - угловая скорость поворота платформы (за положительное направление принимается поворот по часовой стрелке), рад/с;  $M_c$  – момент сопротивления повороту, Н·м;  $\Psi$  – угол смещения центра поворота в продольном направлении, рад.

Отметим, что полный занос гусеничной платформы является некоторым идеальным случаем сочетания модельных параметров, который на практике практически не реализуется. В тоже время, ввиду влияния различных факторов, целесообразно определить минимальную скорость, при достижении которой занос гусеничной платформы уже становится возможным.

Занос гусеничной платформы под действием центробежной силы начнется при условии  $\chi = \frac{L}{2}$ , когда центробежная сила, возникающая при повороте на данном радиусе уравнивается поперечными реакциями грунта, действующими с одной стороны на всей длине опорной поверхности гусениц [2].

Таким образом:

$$F_{y1} = \frac{m_n \cdot V_{cx1}^2}{R_2 - \frac{B}{2}} \quad (2)$$

где  $m_n$  – масса гусеничной платформы, кг.

Сила сопротивления грунта повороту гусеничной платформы будет равна:

$$F_{csp} = \mu \cdot G \quad (3)$$

где  $\mu$  – коэффициент сопротивления повороту;  $G$  - вес гусеничной платформы, Н.  
Тогда:

$$V_{cx1}^2 = \frac{\mu \cdot G \cdot \left(R_2 - \frac{B}{2}\right)}{m_n} \quad (4)$$

Откуда минимальная скорость, при которой уже возможен занос:

$$V_{ckp} = V_{cx1} = \sqrt{\frac{\mu \cdot G \cdot \left(R_2 - \frac{B}{2}\right)}{m_n}} = \sqrt{\mu \cdot g \cdot \left(R_2 - \frac{B}{2}\right)} \quad (5)$$

Это соотношение позволяет определить скорость гусеничной платформы до которой ее следует разогнать, чтобы исследовать поворот на грунте с характеристикой  $\mu$  и различными радиусами поворота.

Средние значения коэффициента сопротивления повороту  $\mu_{max}$  для различных дорожно-грунтовых условий приведены в таблице 1.

Таблица 1

Коэффициент сопротивления повороту $\mu_{max}$				
Дорожно-грунтовые условия			$\mu_{max}$	
Сухой	дернистый	суглинок	(влажность менее 8%)	0,8-1,0
Сухая грунтовая дорога (влажность менее 8%)				0,7-0,9
Пахота (влажность менее 8%)				0,6-0,8
Влажный (более 20%) суглинистый грунт				0,3-0,4
Снег				0,25-0,7

В реальных условиях радиус поворота все время меняется и таким образом, процесс является неустановившемся. В этой связи, для моделирования поворота гусеничной платформы с заносом было признано целесообразным применить зависимость коэффициента сопротивления повороту по соотношению [3].

$$\mu = \begin{cases} \frac{\mu_{\max}}{0,905 + 0,19 \frac{R_o}{L}} & \text{при } \frac{R_o}{L} \leq 2,8 \\ \frac{\mu_{\max}}{0,965 + 0,07 \frac{R_o}{L}} & \text{при } \frac{R_o}{L} > 2,8 \end{cases} \quad (6)$$

где  $\mu_{\max}$  – значение коэффициента сопротивления повороту, которое определяется характеристикой грунта.

При этом действительный радиус поворота равен:

$$R_o = \frac{V_{cx1}}{\theta} = R_2 - \frac{B}{2} \quad (7)$$

Как видно, соотношение (6) позволяет определить  $\mu$  как функцию радиуса поворота.

Совместное использование выражения (5) и выражения (6) для коэффициента сопротивления повороту  $\mu$  позволили получить зависимость минимальной скорости, при которой возможен занос в виде:

$$V_{ckp} = \begin{cases} \sqrt{\frac{\mu_{\max} \cdot g \cdot \left(R_2 - \frac{B}{2}\right)}{0,905 + 0,19 \cdot \frac{R_2 - \frac{B}{2}}{L}}} & \text{при } \frac{R_2 - \frac{B}{2}}{L} \leq 2,8 \\ \sqrt{\frac{\mu_{\max} \cdot g \cdot \left(R_2 - \frac{B}{2}\right)}{0,965 + 0,07 \cdot \frac{R_2 - \frac{B}{2}}{L}}} & \text{при } \frac{R_2 - \frac{B}{2}}{L} > 2,8 \end{cases} \quad (8)$$

После преобразований, получим:

$$R_{\min}^{\text{занос}} = \begin{cases} \frac{1,81 \cdot V_{ckp}^2 \cdot L + \mu_{\max} \cdot g \cdot B \cdot L - 0,19 \cdot V_{ckp}^2 \cdot B}{2 \cdot L \cdot \mu_{\max} \cdot g - 0,38 \cdot V_{ckp}^2} & \text{при } \frac{R_2 - \frac{B}{2}}{L} \leq 2,8 \\ \frac{1,93 \cdot V_{ckp}^2 \cdot L + \mu_{\max} \cdot g \cdot B \cdot L - 0,07 \cdot V_{ckp}^2 \cdot B}{2 \cdot L \cdot \mu_{\max} \cdot g - 0,14 \cdot V_{ckp}^2} & \text{при } \frac{R_2 - \frac{B}{2}}{L} > 2,8 \end{cases} \quad (9)$$

Как видно, полученное выражение (8) позволяет решать и обратную задачу – определять минимальный радиус поворота гусеничной платформы до значения которо-

го, для заданних скорости движения и дорожно-грунтовых условий, занос не возникает.

Продольная составляющая центробежной силы определяется выражением:

$$F_{x1} = \frac{F_{y1}^2 \cdot L}{2\mu \cdot G \left( R_2 - \frac{B}{2} \right)} \quad (10)$$

Относительная величина смещения центра поворота в продольном направлении будет равна:

$$\chi = \frac{F_{y1} \cdot L}{2\mu \cdot G} \quad (11)$$

Скорость центра тяжести гусеничной платформы в повороте определяется соотношением:

$$V_{\text{свл}} = \frac{V_2 + V_1}{2}, \quad (12)$$

где  $V_2$  – скорость на забегающей гусенице, м/с;  $V_1$  – скорость на отстающей гусенице, м/с.

В свою очередь, скорости забегающей и отстающей гусеницы при повороте взаимосвязаны следующим выражением:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{R_2}{R_1}, \quad (13)$$

где  $R_1$  – радиус поворота отстающей гусеницы, м.

При движении подвижной платформы по криволинейной траектории в процессе поворота, с учетом действия центробежной силы, сила тяги на забегающей гусенице будет равна [4]:

$$P_2 = f \left( \frac{G}{2} + F_{y1} \frac{h_c}{B} \right) + \frac{\mu GL}{4B} \left[ 1 - \left( \frac{2\chi}{L} \right)^2 \right] + \frac{F_{x1}}{2}. \quad (14)$$

Соответственно сила торможения отстающей гусенице будет определяться выражением:

$$P_1 = -f \left( \frac{G}{2} - F_{y1} \frac{h_c}{B} \right) + \frac{\mu GL}{4B} \left[ 1 - \left( \frac{2\chi}{L} \right)^2 \right] - \frac{F_{x1}}{2}, \quad (15)$$

где:  $f$  – коэффициент сопротивления грунта качению гусеничной платформы.

Таблица 2

Расчетные данные движения танка Т-64А в повороте

№ передачи	$V_2$ , м/с	$R_2$ , м	$R_2 - B/2$ , м	$V_1$ , м/с	$R_1$ , м	$V_c$ , м/с	$V_{\text{скр}}$ , м/с
1	2	3	4	5	6	7	8
1	2,06	2,73	1,365	0	0	1,03	3,33
2	3,83	5,9	4,535	2,06	3,17	2,94	5,67
3	4,83	13,1	11,735	3,82	10,37	4,33	8,02

1	2	3	4	5	6	7	8
4	6,05	13,76	12,395	4,85	11,03	5,45	9,12
5	8,28	9,94	8,575	6,01	7,21	7,14	7,22
6	11,44	9,89	8,525	8,28	7,16	9,86	7,21
7	16,8	8,57	7,205	11,45	5,84	14,12	6,78

Таблица 3

Расчетные данные движения танка Т-64А в повороте

№ пере- дачи	$\mu$	$F_{y1}$ , Н	$F_{x1}$ , Н	$\chi$ , м	$P_2$ , Н	$P_1$ , Н
1	0,828	29534,21	4392,27	0,203	132963,36	106204,29
2	0,722	72427,08	9119,26	0,571	114628,97	83142,91
3	0,559	60712,25	3197,29	0,618	88460,03	62895,94
4	0,684	91060,51	5561,34	0,757	102798,86	74870,72
5	0,621	225915,43	54535,85	2,07	48682,2	-28220,45
6	0,622	433354,23	201503,36	3,964	-101176,77	-325046,93
7	0,652	1051523,55	1339178,36	9,176	-964229,51	-2325774,7

На рис. 2 и 3 приведены данные о коэффициенте сопротивления повороту и критической скорости движения по заносу, которые интерполированы функцией относительного радиуса поворота.

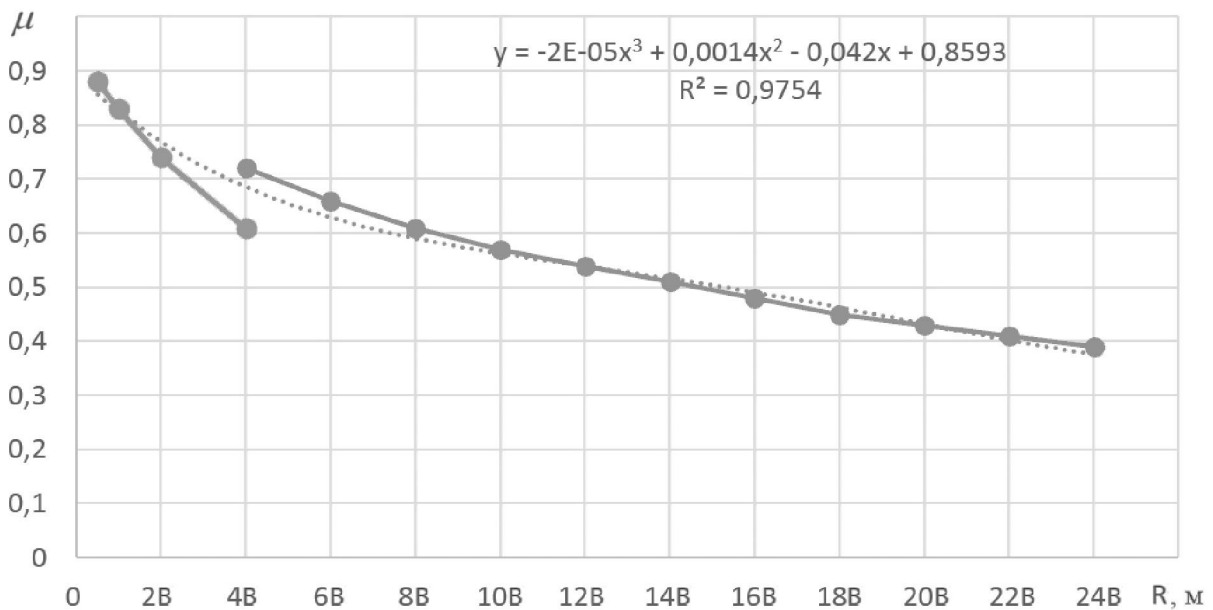


Рис. 2. Коэффициент сопротивления повороту как функция относительного радиуса поворота ( $B=2,73$ )

Функция коэффициента сопротивления повороту от относительного радиуса поворота, при величине достоверности аппроксимации ( $R^2=0,9754$ ) определена выражением:

$$\mu = -0,00002R^3 + 0,0014R^2 - 0,042R + 0,8593 \quad (16)$$

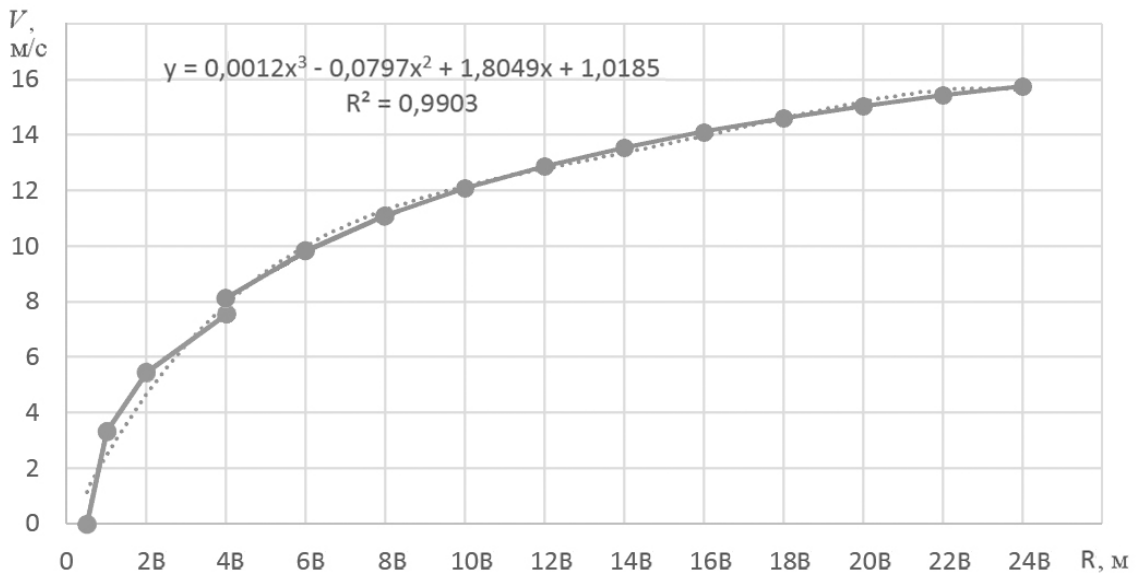


Рис. 3. Зависимость критической скорости от относительного радиуса поворота ( $\mu_{max}=0,8$ ;  $B=2,73$ м;  $L=4,242$ м)

Область, находящаяся над графиком, является зоной заноса гусеничной платформы:

$$V_{кр} = 0,0012R^3 - 0,0797R^2 + 1,8049R + 1,0185. \quad (17)$$

После того, как основные параметры определены, приступаем к параметрическим исследованиям.

На рис. 4 и 5 представлены результаты моделирования при движении на третьей и пятой передачах, выполненные на основе методики [5]. При этом представлена траектория поворота, соответствующая положению рычага до упора, а также траектория прямолинейного движения ( $a_{ц.с.}=0$ ). Как видно из приведенных данных, модель достаточно точно отражает величину радиуса поворота, которая асимптотически приближается к фиксированному радиусу поворота для движения на каждой из передач. При этом, скорость движения при совершении поворота снижается. Практически это означает, что при неизменном положении педали подачи топлива обороты падают, мощность возрастает, скорость снижается.

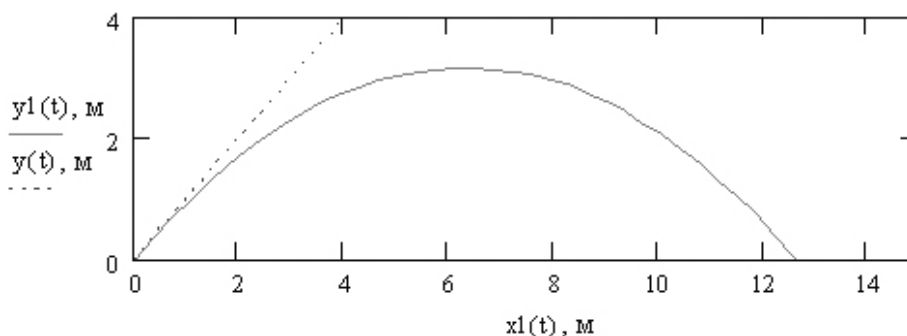


Рис. 4. Траектория движения платформы типа Т-64А на третьей передаче скорость вхождения в поворот  $V_0=15,59$ км/час= $4,33$ м/с,  $a_{цс}=1,6$ м/с<sup>2</sup>,  $V_0x=V_0y=3,07$ м/с и траектория прямолинейного движения для тех же условий.

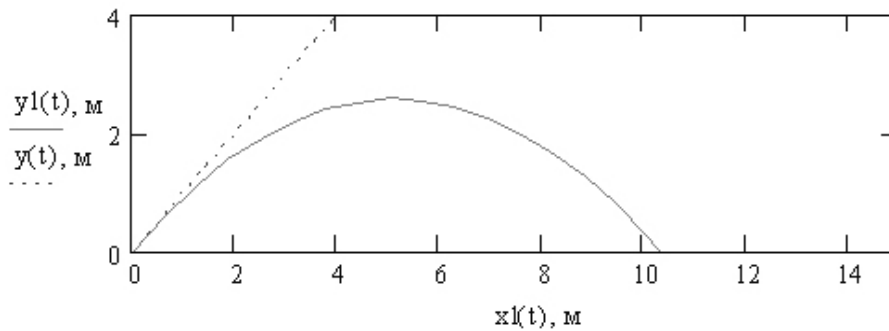


Рис. 5. Траектория движения платформы типа Т-64А на пятой передаче скорость вхождения в поворот  $V_0=25,7\text{км/час}=7,14\text{м/с}$ ,  $a_{цс}=5,95\text{м/с}^2$ ,  $V_0x=V_0y=5,05\text{м/с}$  и траектория прямолинейного движения для тех же условий.

Для того чтобы практически выполнить поворот увеличивают подачу топлива и, тем самым, поддерживают скорость движения. Подчеркнем еще раз, что увеличение скорости движения при движении по радиальной траектории приводит к росту центробежной силы, которая может достичь такого значения, что превысит совокупность центростремительных сил. Это в свою очередь приведет к заносу платформы. В этой связи практический интерес представляет рассмотрение трех областей, ограниченных следующими траекториями:  $a_{цс}>0$  и  $a_{цс}=0$ , что представлено на рис. 6.

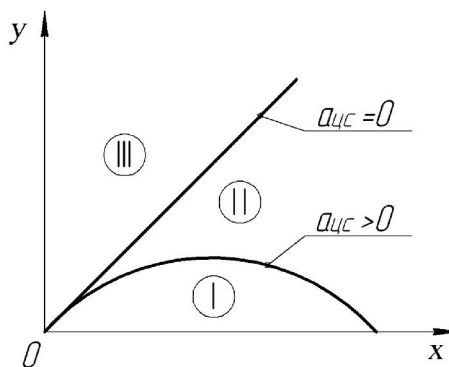


Рис. 6. Анализ областей ограниченных траекториями

Траектория  $a_{цс}>0$ , соответствующая фиксированной передаче определяет движение по фиксированному радиусу поворота, соответствующее максимальной скорости движения на этой передаче. Таким образом, область (I) (рис. 6) определяет недоступную на данной передаче и скорости область. Полупространство между траекториями  $a_{цс}>0$ , и  $a_{цс}=0$ , обозначенное (II) на (рис. 6) соответствует движению в повороте с промежуточным положением рычага от исходного, до полностью выбранного для фиксированной передачи и соответствующей ей скорости. При этом в данном диапазоне возможно возникновение заноса подвижной гусеничной платформы, начало которого определяется выражением 9 и графиком на (рис. 3). Наконец, часть полупространства над прямой  $a_{цс}=0$  – область (III), соответствует условию движения при повороте в обратную сторону для прочих тех же условий.

Таким образом, построенные траектории для различных условий движения и дорожных условий определяют совокупность области недоступной для поворота (маневра), криволинейного движения без заноса и условий при которых возникает занос. С точки зрения создания SEP – системы для гусеничной платформы последнее из перечисленных условий является ограничивающим скорость движения, а область находящаяся под графиком на рис 3 позволяет определить максимальную скорость движения на каждой из передач, в зависимости от дорожно-грунтовых условий.



**Выводы.**

1. Применительно к процессу неустановившегося движения гусеничной платформы при повороте получено выражение, которое позволяет определять минимальный радиус поворота гусеничной платформы до значения которого, для заданных скорости движения и дорожно-грунтовых условий, занос не возникает.

2. Определены характерные области траекторий движения гусеничных платформ с заносом, с произвольным радиусом и область, недоступную для поворота.

3. Построенные траектории для максимальных скоростей соответствующих передач определяют приемлемые режимы движения гусеничной платформы для заданных дорожно-грунтовых условий при создании SEP - системы.

**Литература:** 1. Теория движения танков и БМП. Чобиток В.А. М.: Военное издательство. 1984г. – 264с. 2. Никитин А.О., Сергеев Л.В. Теория танка. М.: Издание академии БТВ, 1962, – 578с. 3. ОСТ В3-5971-85. Метод расчета динамических процессов в МТУ в переходных режимах работы. Введ. 01.01.85 – М.: 1985. – 12с. 4. Волонцевич Д.О. Оценка необходимой мощности двухпоточного механизма поворота гусеничной машины / Д.О. Волонцевич, Н.Г. Медведев, Ши Хиен Зыонг // Вісник НТУ «ХПИ», 2014. – № 22 (1065). – С. 73–83. 5. Ковтонуик И.Б. Аналитическое решение задачи математического моделирования движения центра масс подвижной платформы / И.Б. Ковтонуик, Г.Ф. Шаблій, С.А. Волосников // Інтегровані технології та енергозбереження, 2015. – № 2. – С. 30–36.

**Bibliography (transliterated):** 1. Teoriya dvizheniya tankov i BMP. Chobitok V.A. M.: Voennoe izdatel'stvo. 1984g. – 264s. 2. Nikitin A.O., Sergeev L.V. Teoriya tanka. M.: Izdanie akademii BTV, 1962, – 578s. 3. OST V3-5971-85. Metod rascheta dinamicheskikh protsessov v MTU v perehodnyih rezhimah raboty. Vved. 01.01.85 – M.: 1985. – 12s. 4. Volontsevich D.O. Otsenka neobhodimoy moschnosti dvuhpotochnogo mehanizma povorota gusenichnoy mashiny / D.O. Volontsevich, N.G. Medvedev, Shi Hiop Zyiong // VIsnik NTU «HPI», 2014. – № 22 (1065). – S. 73–83. 5. Kovtonyuk I.B. Analiticheskoe reshenie zadachi matematicheskogo modelirovaniya dvizheniya tsentra mass podvizhnoy platformy / I.B. Kovtonyuk, G.F. Shabliy, S.A. Volosnikov // IntegrovanI tehnologIYi ta energozberezhennya, 2015. – № 2. – S. 30–36.

Волосніков С.О.

**МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ КРИТИЧНОЇ ШВИДКОСТІ РУХУ ГУСЕНИЧНОЇ ПЛАТФОРМИ ПО ЗАНЕСЕННЮ**

Стосовно до процесу несталого руху гусеничної платформи виконано моделювання процесу криволінійного руху гусеничної платформи, яке спрямоване на визначення прийнятних режимів руху для заданих дорожніх умов при створенні SEP - системи.

Волосников С.А.

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКОЙ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ГУСЕНИЧНОЙ ПЛАТФОРМЫ ПО ЗАНОСУ**

Применительно к процессу неустановившегося движения гусеничной платформы выполнено моделирование процесса криволинейного движения гусеничной платформы, которое направлено на определение приемлемых режимов движения для заданных дорожных условий при создании SEP - системы.

S. Volosnikov

**METHOD FOR DETERMINING THE TRACKED VEHICLE CRITICAL SPEED WHICH RESULTS IN SKIDDING**

As applied to the process of tracked vehicle unsteady movement, the simulation of tracked vehicle curvilinear motion was made to determine the suitable driving modes for the specified road conditions during creation of SEP system.