

УДК 631.363

ВЛИЯНИЕ ПОДЪЕМНО-НАВЕСНОГО УСТРОЙСТВА НА ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗКИ НА КОЛЕСАХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ТРАКТОРА

В. Б. ПОПОВ

Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь

Ключевые слова: сельскохозяйственный трактор, подъемно-навесное устройство, опорное колесо плуга, гидроцилиндр, механизм навески.

Введение

Известно, что использование в составе машинно-тракторного агрегата (МТА) навесных машин и орудий [1], [2] изменяет распределение нормальных реакций почвы на колеса сельскохозяйственного трактора. В процессе эксплуатации МТА нагрузка на колеса трактора перманентно изменяется, что влияет как на опорную поверхность, так и на характеристики трактора, например, его сцепной вес и управляемость [1]. Совершенствование технологических процессов в растениеводстве связано с научно обоснованным выбором рациональных параметров МТА, в том числе его подъемно-навесного устройства (ПНУ). В вышеперечисленных учебниках [1], [2] влияние отдельных параметров ПНУ на величину реакции на опорном колесе навесного плуга определяется графоаналитически. Формализованное описание взаимосвязи параметров ПНУ с характеристиками ходовой системы трактора расширяет базу их функционального математического моделирования и повышает эффективность режима автоматизированного проектирования.

Цель работы – получение аналитических выражений, связывающих внутренние параметры ПНУ с изменением нормальных реакций почвы на колеса сельскохозяйственного трактора.

Основная часть

Реакции почвы на колеса неподвижного трактора, свободного от нагрузки на ПНУ, представляют статические значения реакций опорной поверхности:

$$Y_{\text{п}} = \frac{1}{L} G a_{\text{ц}}; \quad Y_{\text{к}} = \frac{1}{L} G (L - a_{\text{ц}}), \quad (1)$$

где $Y_{\text{п}}$, $Y_{\text{к}}$ – реакции почвы на передние и задние колеса трактора соответственно; L – база трактора; G , $a_{\text{ц}}$ – вес и координата центра тяжести трактора соответственно.

Использование в составе пахотных МТА навесных машин и орудий ведет к перераспределению нормальных реакций опорной поверхности на колеса сельскохозяйственного трактора (рис. 1).

Нормальная реакция почвы на опорное колесо навесного плуга (НП) определяется из уравнения моментов вокруг мгновенного центра вращения (МЦВ) звена L_6 , имитирующего навесной плуг:

$$R_{\text{рез}} m_{\text{н}} = Y_{\text{м}} L_{\text{н}},$$

откуда

$$Y_M = \frac{R_{рез} m_n}{L_H}. \quad (2)$$

Плечо m_n действия результирующей силы $R_{рез}$ определяем, используя сведения из аналитической геометрии [3]. Зная координаты точки (x_0, y_0) приложения силы $R_{рез}$ и угол ее действия θ , определяем уравнение прямой по точке и угловому коэффициенту:

$$y = k(x - x_0) + y_0,$$

где $k = \text{arctg}\theta$. Здесь $y = k(x - x_0) + y_0$ эквивалентно уравнению $ax + by + c = 0$.

Минимальное расстояние до эквидистантной линии (с теми же коэффициентами), проходящей через точку P – МЦВ, но уже с другими координатами (x_p, y_p) , определяется по выражению

$$m_n = \frac{|ax_p + by_p + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}}, \quad (3)$$

где $a = k = \text{arctg}\theta$, $b = -1$, $c = y_0 - kx_0$.

Если принять, что $R_{рез}$ как характеристика данного плуга, стабильно пашущего в заданных условиях не изменяется, то нагрузку на опорное колесо можно уменьшить или увеличить, изменяя размеры L_H и m_n , причем последний параметр, в свою очередь, зависит от координат МЦВ. Простой способ изменения координат МЦВ состоит в изменении угла наклона к горизонту верхней (центральной) тяги L_7 , изменив координаты ее неподвижного шарнира Π_{07} .

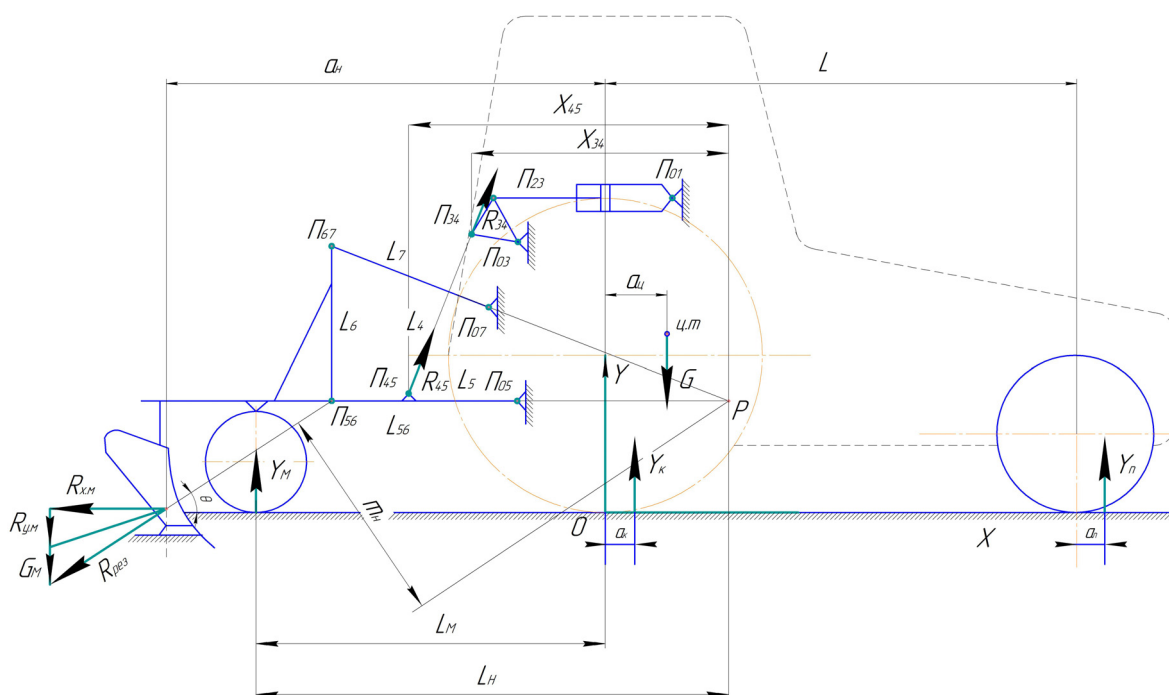


Рис. 1. Силы, действующие на навесной плуг и трактор

Известно, расположение МЦВ НП в продольно-вертикальной плоскости связано со способностью его рабочих органов к самозаглублению в почву [4], [5]. Поэтому его положение выбирают так, чтобы момент, создаваемый внешними силами ($R_{\text{рез}} m_{\text{н}}$), при любых условиях работы МТА имел положительное значение.

МЦВ НП находится на пересечении линий, являющихся продолжением верхней и нижней тяг механизма навески (МН) трактора (рис. 1). Полюс МЦВ – P в системе координат, связанной с задним колесом трактора, получим, проведя лучи через L_7 , L_{56} – тяги МН. Совместное решение уравнений, проходящих через верхнюю и нижние тяги внешнего четырехзвенника МН однозначно определяет полюс МЦВ в зависимости от положения неподвижных и подвижных шарниров внешнего четырехзвенника МН:

$$X_p = \frac{(Y_{56}X_{05} - Y_{05}X_{56})(X_{07} - X_{67}) - (X_{05} - X_{56})(Y_{67}X_{07} - Y_{07}X_{67})}{(Y_{07} - X_{67})(X_{05} - X_{56}) - (X_{07} - X_{67})(Y_{05} - Y_{56})}; \quad (4)$$

$$Y_p = X_p \frac{Y_{56} - Y_{05}}{X_{56} - X_{05}} + \frac{Y_{05}X_{56} - X_{05}Y_{56}}{X_{56} - X_{05}}.$$

Следует отметить, что координаты подвижных шарниров внешнего четырехзвенника МН (и связанные с ним характерные точки, например, положение оси подвеса и центр тяжести НП) определяются по результатам геометрического анализа кинематической цепи, объединяющей плоские аналоги МН и плуга [6].

Таким образом, координаты МЦВ однозначно соответствуют текущему рабочему положению оси подвеса (L_{56}) МН, а колебания НП в продольно-вертикальной плоскости, связанного с шарнирами верхней и нижних тяг МН, также однозначно соответствуют текущему рабочему положению оси подвеса.

Из рис. 1 видно, что $L_{\text{н}} = |X_p| + X_{\text{м}}$, где $X_{\text{м}}$ – горизонтальная координата опорного колеса.

В результате реакция на колесе НП – $Y_{\text{м}}$, пропорциональная результирующему моменту ($M_{\text{рез}} = R_{\text{рез}} m_{\text{н}}$) и обратно пропорциональная $L_{\text{н}}$, полностью рассчитывается аналитически.

Определим взаимосвязь между нормальной реакцией почвы на опорное колесо навесного плуга и реакциями колес трактора (рис. 1):

$$Y_{\text{п}} + Y_{\text{к}} = G + R_{\text{XM}} \text{tg}\theta - Y_{\text{м}}. \quad (5)$$

Из уравнения (5) видно, что за счет силового воздействия НП суммарная реакция на колесах трактора выросла на величину:

$$\Delta = R_{\text{XM}} \text{tg}\theta - Y_{\text{м}}. \quad (5a)$$

Следовательно, изменяя величину реакции на опорном колесе $Y_{\text{м}}$ НП, можно изменять реакции почвы на колесах трактора.

Представляют интерес реакции почвы на передние и задние колеса трактора в процессе установившегося движения. Составим уравнение равновесия моментов относительно точки O :

$$Y_{\text{п}}(L + a_{\text{п}}) = Ga_{\text{ц}} - Y_{\text{к}}a_{\text{к}} + Y_{\text{м}}L_{\text{м}} - R_{\text{XM}} \text{tg}\theta a_{\text{н}}. \quad (6)$$

Отсюда выразим реакцию почвы на передние колеса:

$$Y_{\text{п}} = \frac{Ga_{\text{ц}} - Y_{\text{к}}a_{\text{к}} - Y_{\text{п}}a_{\text{п}} + Y_{\text{м}}L_{\text{м}} - R_{\text{XM}} \operatorname{tg}\theta a_{\text{н}}}{L}.$$

Или с учетом реакции почвы на передние колеса у неподвижного трактора (1):

$$Y_{\text{п}} = \frac{1}{L} Ga_{\text{ц}} - \frac{R_{\text{XM}} \operatorname{tg}\theta a_{\text{н}} + M_{\text{ф}} - Y_{\text{м}}L_{\text{м}}}{L} = Y_{\text{п.ст}} - \frac{R_{\text{XM}} \operatorname{tg}\theta a_{\text{н}} + M_{\text{ф}} - Y_{\text{м}}L_{\text{м}}}{L}, \quad (7)$$

где $M_{\text{ф}} = Y_{\text{к}}a_{\text{к}} + Y_{\text{п}}a_{\text{п}}$ – момент трения качения колес трактора.

Из уравнения (5) с учетом выражения (7) найдем реакцию почвы на задние колеса трактора, движущегося равномерно и прямолинейно:

$$Y_{\text{к}} = Y_{\text{к.ст}} + \frac{R_{\text{XM}} \operatorname{tg}\theta(L + a_{\text{м}}) + M_{\text{ф}} - Y_{\text{м}}(L - L_{\text{м}})}{L}. \quad (8)$$

Из выражений (7) и (8) видно, что при работе с НП статическая реакция почвы на передние и задние колеса трактора перераспределяется и существенно зависит от реакции на опорном колесе плуга.

Изменять параметры ПНУ сельскохозяйственного трактора можно не только через его МН, но также через гидропривод, или, точнее, через изменение давления рабочей жидкости в гидроцилиндре, сформировав на опорном колесе нужную реакцию. Тогда вес НП и реакция почвы на опорное колесо частично или полностью передаются на трактор, поэтому представляет интерес связь силы, движущей поршень гидроцилиндра, с заглубляющим моментом.

Здесь (рис. 1) со стороны раскоса (L_4) компоненты силы $R_{45} - R_{45}^y$ и R_{45}^x действуют на нижнюю тягу (тяги) на плече $X'_{45} = X_{45} + |X_p|$ и на плече $Y'_{45} = Y_{45} + |Y_p|$ соответственно. Принимаем заданную глубину вспашки постоянной. Тогда из условия статического равновесия механической системы составим уравнение моментов относительно полюса МЦВ:

$$R_{\text{рез}}m_{\text{н}} - Y_{\text{м}}L_{\text{н}} - R_{45}^y X'_{45} + R_{45}^x Y'_{45} = 0, \quad (9)$$

при этом

$$R_{45}^y = R_{45} \cos \varphi_4 \quad \text{и} \quad R_{45}^x = R_{45} \sin \varphi_4, \quad (10)$$

где φ_4 – угол, характеризующий направление звена L_4 – раскоса.

Из выражения (9) следует, что, если

$$R_{\text{рез}}m_{\text{н}} = R_{45}^y X'_{45} - R_{45}^x Y'_{45}, \quad (11)$$

то $Y_{\text{м}}L_{\text{н}} = 0$ и, следовательно, реакция на опорном колесе равна нулю.

Подставим выражения (10) в правую часть выражения (11):

$$R_{45}^y X'_{45} - R_{45}^x Y'_{45} = R_{45} (X'_{45} \cos \varphi_4 - Y'_{45} \sin \varphi_4).$$

В результате определим модуль силы, действующей со стороны раскоса на нижнюю тягу МН, достаточный для обеспечения нулевой реакции на опорном колесе НП:

$$R_{45} = \frac{R_{\text{рез}}m_{\text{н}}}{X'_{45} \cos \varphi_4 - Y'_{45} \sin \varphi_4}. \quad (12)$$

Следует отметить, что сила, действующая со стороны поворотного рычага на раскос по величине и направлению равна силе, действующей со стороны раскоса на нижнюю тягу, т. е. $\vec{R}_{34} = \vec{R}_{45}$.

На основании того, что силы R_{34} и R_{23} формируют одинаковые нагружающий и движущий моменты на поворотном рычаге МН можно составить уравнение:

$$R_{34}(X_{34} \cos \varphi_{34} - Y_{34} \sin \varphi_{34}) = R_{23}(X_{23} \cos \varphi_3 - Y_{23} \sin \varphi_3),$$

откуда

$$R_{23} = R_{34} \frac{X_{34} \cos \varphi_{34} - Y_{34} \sin \varphi_{34}}{X_{23} \cos \varphi_3 - Y_{23} \sin \varphi_3} = R_{34} K_{34}.$$

Подставляя вместо R_{45} его развернутое выражение, получим аналитическое выражение для приведенной к штоку гидроцилиндра нагрузки:

$$R_{23} = \frac{R_{\text{рез}} m_{\text{н}}}{X'_{45} \cos \varphi_4 - Y'_{45} \sin \varphi_4} \cdot \frac{X_{34} \cos \varphi_{34} - Y_{34} \sin \varphi_{34}}{X_{23} \cos \varphi_3 - Y_{23} \sin \varphi_3}.$$

Приведенная к штоку гидроцилиндра нагрузка компенсируется развиваемым на штоке гидроцилиндра противодействием, равным произведению давления рабочей жидкости на площадь поршня ($F_{\text{гц}} = p_{\text{гц}} S_{\text{гц}}$) со стороны напорной гидромагистрали. В результате с учетом потерь на трение [7] имеем:

$$F_{\text{гц}} = \frac{R_{\text{рез}} m_{\text{н}}}{\eta_{\text{МН}} (X'_{45} \cos \varphi_4 - Y'_{45} \sin \varphi_4)} K_{34}.$$

где $\eta_{\text{МН}}$ – КПД МН.

Обеспечивающее нулевую реакцию на опорном колесе НП давление в напорной полости гидроцилиндра рассчитывается по выражению

$$p_{\text{гц}} = \frac{R_{\text{рез}} m_{\text{н}}}{\eta_{\text{МН}} S_{\text{гц}} (X'_{45} \cos \varphi_4 - Y'_{45} \sin \varphi_4)} K_{34},$$

где $S_{\text{гц}}$ – удвоенная площадь сечения поршня гидроцилиндра МН.

Углы $\varphi_4, \varphi_{34}, \varphi_3$ – характеризующие положение соответствующих звеньев МН, определяются по результатам геометрического анализа [6].

Поддерживая расчетное давление в гидроцилиндре МН, например, с помощью гидроаккумулятора [5], можем обеспечить требуемую реакцию на опорном колесе НП и одновременно соответствующие реакции почвы на передних и задних колесах трактора.

Рассмотрим еще раз уравнение (9), преобразовав его таким образом, чтобы получить выражения для нагрузки на гидроцилиндре и для давления в его напорной полости в зависимости от реакции на опорном колесе плуга:

$$F_{\text{гц}} = \frac{R_{\text{рез}} m_{\text{н}} - Y_{\text{м}} L_{\text{н}}}{\eta_{\text{МН}} (X'_{45} \cos \varphi_4 - Y'_{45} \sin \varphi_4)} K_{34},$$

$$p_{\text{гц}}(Y_{\text{м}}) = \frac{R_{\text{рез}} m_{\text{н}} K_{34}}{\eta_{\text{МН}} S_{\text{гц}} (X'_{45} \cos \varphi_4 - Y'_{45} \sin \varphi_4)} - Y_{\text{м}} \frac{L_{\text{н}} K_{34}}{\eta_{\text{МН}} S_{\text{гц}} (X'_{45} \cos \varphi_4 - Y'_{45} \sin \varphi_4)}.$$

Зависимость давления в гидроцилиндре МН от реакции на опорном колесе плуга имеет линейный характер, она представлена на рис. 2. Увеличивая давление в гидроцилиндре, мы снижаем реакцию на опорном колесе и догружаем задний мост трактора, что способствует росту его сцепного веса.

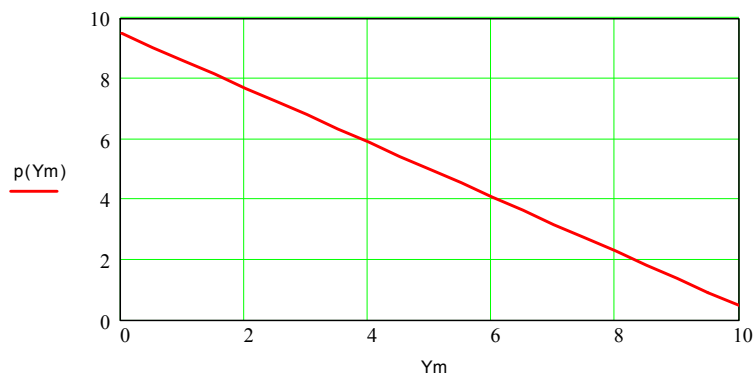


Рис. 2. Зависимость давления в гидроцилиндре механизма навески от реакции на опорном колесе плуга

Результаты расчета агрегатирования МТА, состоящего из сельскохозяйственного трактора «Беларус-1523» и плуга навесного 6-корпусного ПЛН-6-35П (рис. 3), сведены в табл. 1 и 2.

Результаты расчета геометрических и силовых параметров МТА представлены для рабочего положения оси подвеса ($Y_{56} = 0,400$ м) с отклонениями ± 16 мм, что соответствует предполагаемым вертикальным колебаниям лемехов плуга в ходе выполнения НП технологического процесса.

Для обеспечения нулевой реакции на опорном колесе НП давление в напорной полости гидроцилиндра должно составить соответственно 9,448 и 7,694 МПа (табл. 1 и табл. 2), что связано с изменением параметров внешнего четырехзвенника (табл. 1 $Y_{07} = 0,895$ м; $L_7 = 0,785$ м; табл. 2 $Y_{07} = 0,845$ м; $L_7 = 0,801$ м).



а)



б)

Рис. 3. Компоненты машинно-тракторного агрегата:
а – сельскохозяйственный трактор «Беларус-1523»;
б – плуг навесной 6-корпусный ПЛН-6-35П

Таблица 1

Результаты расчета выходных параметров машинно-тракторного агрегата при исходных значениях параметров внешнего четырехзвенника механизма навески

S	Y_{56}	m_n	X_p	Y_p	Y_m	$M_{рез}$	L_7	Y_{07}	$p_{ГЦ}$	Y_n	Y_k
[м]	[м]	[м]	[м]	[м]	[кН]	[кНм]	[м]	[м]	[МПа]	[кН]	[кН]
0,440	0,384	1,181	-0,778	0,565	10,599	23,306	0,785	0,895	9,419	25,51	47,49
0,442	0,392	1,176	-0,761	0,556	10,556	23,266	0,785	0,895	9,436	25,65	47,35
0,444	0,400	1,171	-0,743	0,548	10,512	23,230	0,785	0,895	9,448	25,85	47,15
0,446	0,408	1,166	-0,726	0,540	10,468	23,192	0,785	0,895	9,457	25,90	47,10
0,448	0,416	1,162	-0,708	0,532	10,425	23,154	0,785	0,895	9,479	25,97	47,03

Таблица 2

Результаты расчета выходных параметров машинно-тракторного агрегата при изменении параметров внешнего четырехзвенника механизма навески

S	Y_{56}	m_n	X_p	Y_p	Y_m	$M_{рез}$	L_7	Y_{07}	$p_{ГЦ}$	Y_n	Y_k
[м]	[м]	[м]	[м]	[м]	[кН]	[кНм]	[м]	[м]	[МПа]	[кН]	[кН]
0,440	0,384	0,903	-0,483	0,537	8,674	17,818	0,801	0,845	7,767	12,51	60,49
0,442	0,392	0,897	-0,470	0,531	8,616	17,780	0,801	0,845	7,736	12,65	60,35
0,444	0,400	0,891	-0,457	0,526	8,558	17,741	0,801	0,845	7,694	12,39	60,61
0,446	0,408	0,885	-0,443	0,520	8,499	17,703	0,801	0,845	7,596	12,90	60,10
0,448	0,416	0,879	-0,430	0,515	8,441	17,154	0,801	0,845	7,509	12,97	60,03

Заключение

Изменяя исходные данные – параметры внешнего четырехзвенника МН, т. е. размер его звеньев и координаты неподвижных шарниров, а также поддерживая требуемый уровень давления рабочей жидкости в гидроцилиндре (гидроцилиндрах) ПНУ, можно корректировать величину опорных реакций на колесах трактора.

С изменением вертикальной нагрузки на колеса трактора корректируется тяговый баланс МТА, так как изменяется сцепной вес трактора, а значит и его касательная сила тяги. При этом сопротивление качению опорного колеса НП можно понизить до допустимого минимума.

Связи между геометрическими и силовыми параметрами ПНУ трактора, с одной стороны, и опорными реакциями на колесах трактора с другой, в статье представлены в виде аналитических выражений, позволяющих математически моделировать и решать аналогичные задачи, в первую очередь, для почвообрабатывающих МТА, сформированных на базе колесных тракторов и навесных орудий или машин.

Литература

1. Кутьков, Г. М. Тракторы и автомобили. Теория и технологические свойства : учеб. для студентов высш. учеб. заведений / Г. М. Кутьков – М. : КолосС, 2004. – 504 с. : ил.
2. Скотников, В. А. Основы теории и расчета трактора и автомобиля / В. А. Скотников, А. А. Мащенский, А. С. Солонский. – М. : Агропромиздат, 1986. – С. 383.
3. Жуков, Д. А. Аналитическая геометрия. Линейная алгебра. Модуль 1. Аналитическая геометрия : учеб. пособие / Д. А. Жуков ; Юж. федер. ун-т. – Ростов н/Д ; Таганрог : Изд-во Юж. федер. ун-т, 2017. – 41 с.

4. Гуськов, В. В. Тракторы. Ч. III. Конструирование и расчет / В. В. Гуськов. – Минск : Выш. шк., 1981. – С. 383.
5. Тракторы и автомобили : учеб. для студентов вузов, обучающихся по специальности «Автомобиле- и тракторостроение» / В. М. Шарипов [и др.] ; под общ. ред. В. М. Шарипова. – М. : Спектр, 2010. – 351 с. : ил.
6. Попов, В. Б. Функциональная математическая модель анализа подъемно-навесных устройств мобильных энергетических средств / В. Б. Попов // Механика – 2011 : сб. науч. тр. V Белорус. конгр. по теорет. и приклад. механике, Минск, 2011 г. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси ; редкол.: М. С. Высоцкий [и др.], Минск, 2011. – Т. 1. – С. 169–176.
7. Попов, В. Б. Снижение диссипативных потерь в механизмах навески мобильных энергетических средств / В. Б. Попов // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2009. – № 1. – С. 41–48.

Получено 05.03.2020 г.