

**ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕ ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ
С РЕЗИНОАРМИРОВАННЫМИ ГУСЕНИЦАМИ ПРИ РАЗВОРОТЕ
НА МЕСТЕ**

Неверовский Д.С.

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия*

**POWER CONSUMPTION OF A CATERPILLAR MACHINE
WITH RUBBER-ARMORED TRACKS DURING PIVOT TURNING**

Neverovsky D.S.

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Saint Petersburg, Russia*

Аннотация: Представлены результаты экспериментальной оценки энергопотребления гусеничной машины при развороте на месте и прямолинейном движении на асфальте, грунтовой дороге и песке. По измеренным значениям энергопотребления оценены потребные мощности приводных электродвигателей. Установлено, что энергозатраты при развороте на месте превышают энергозатраты на прямолинейное движения в 3,8–5,5 раз.

Abstract: The results of an experimental assessment of the energy consumption of a tracked vehicle during turning in place and straight-line movement on asphalt, a dirt road, and sand are presented. Based on the measured energy consumption values, the required power of the drive electric motors was estimated. It was found that the energy consumption during turning in place exceeds the energy consumption during straight-line movement by 3,8–5,5 times.

Ключевые слова: гусеничная машина, резиноармированные гусеницы, разворот с нулевым радиусом, энергозатраты, электропривод.

Keywords: tracked vehicle, rubber-reinforced tracks, zero-radius turn, energy consumption, electric drive.

Гусеничные машины применяются во всех сферах народного хозяйства, в том числе на покрытиях со слабой несущей способностью. Значительная часть рабочего цикла таких машин приходится на маневрирование, способ выполнения манёвра влияет не только на проходимость, но и на энергопотребление и продолжительность автономной работы машины. Влияние конструкции трансмиссии на энергозатраты при повороте гусеничных трелевочных тракторов исследовано в [1]. Однако для малогабаритных гусеничных машин с раздельным электроприводом бортов и эластичными

гусеницами наблюдается недостаток опубликованных экспериментальных данных о фактическом энергопотреблении.

Разворот на месте или разворот с нулевым радиусом выполняется при движении гусениц в противоположных друг другу направлениях с равными по модулю скоростями. Такой разворот обеспечивает минимально возможный радиус маневра. Особенности взаимодействия гусениц с опорной поверхностью, а также работы трансмиссии в этом режиме рассмотрены В.В. Павловым [2]. В отличие от движения по дуге, при таком маневре центр тяжести машины почти не перемещается, а значительная часть подводимой энергии расходуется на поперечное скольжение, сдвиг поверхностного слоя основания и внутренние потери в двигателе [3, 4]. Для эластичных гусениц дополнительно оказывают влияние деформация резины, трение в направляющем аппарате и предварительное натяжение [5].

Цель работы – экспериментальная оценка энергопотребления гусеничной машины с электроприводом и эластичными гусеницами при развороте на месте с последующим сопоставлением полученных результатов с энергопотреблением при прямолинейном движении в аналогичных условиях.

Исследование было проведено на основе гусеничной платформы «ЖУК» с независимым электроприводом приводом каждого борта и эластичными гусеницами. Такая компоновка позволила обеспечить непосредственную регистрацию электрических параметров каждого тягового двигателя без необходимости разделения общего потока мощности механической трансмиссии. Общий вид платформы представлен на рис. 1, основные технические характеристики гусеничной платформы представлены в табл. 1.



Рисунок 1 – Экспериментальная гусеничная платформа «ЖУК»

Исследования проведены на ровных однородных участках таких покрытий как асфальт, грунтовая дорога, песок. Для каждого покрытия в ходе исследований измерялись показатели при прямолинейном движении платформы и развороте на месте. Каждый опыт был повторен не менее четырех для того, чтобы исключить влияние случайных событий.

С целью обеспечения корректности оценки энергопотребления во всех опытах машине была задана постоянная скорость гусениц – 1 м/с, данное задание избавило от необходимости оценки удельной энергии маневра, позволив проводить оценку по средней потребляемой мощности.

Таблица 1 – Технические характеристики гусеничной платформы «ЖУК»

Параметр	Величина	Параметр		Величина
Снаряженная масса, кг	100	СИЛОВАЯ УСТАНОВКА	Тип электродвигателя	BLDC
Допустимая полная масса, кг	300		Номинальная мощность, кВт	0,75 (1,5 суммарно)
Длина, мм	1230		Передаточное отношение редуктора	10,4
Ширина, мм	1100		Количество, шт.	2
Высота, мм	540	ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ	Тип аккумуляторных батарей	Li-ion
Ширина колеи (расстояние между серединами гусеничных лент), мм	945		Напряжение сети, В	72
Длина опорной поверхности, мм	750		Количество, шт.	1
Ширина гусеницы, мм	100		Общая емкость батарей, А·ч	от 90 до 250

Во время проведения опытов системой регистрации и записи параметров движения регистрировались фактические данные о энергопотреблении такие как напряжение, сила тока в цепи и число оборотов тяговых электродвигателей. Состав и принцип действия системы описаны в [6].

Электрическая мощность на входе каждого регулятора определялась как произведение напряжения и силы тока в цепи. Для приведения результатов к механической мощности на валах тяговых электродвигателей учитывалось потребление регулятора оборотов и КПД электродвигателя:

$$P_{m,i} = U_i I_i \eta_p \eta_d ,$$

где $P_{m,i}$ – механическая мощность i -го двигателя, Вт; U_i и I_i – измеренные напряжение (В) и сила тока (А); $\eta_p = 0,96$ – КПД регулятора оборотов, учитывающее потребляемую им долю мощности; $\eta_d = 0,95$ – принятый КПД тягового электродвигателя.

Суммарная механическая мощность двух бортовых приводов определялась по выражению

$$P_{\Sigma} = P_{m,1} + P_{m,2} .$$

В качестве относительного показателя энергозатрат использовано отношение суммарной механической мощности при развороте на месте $P_{\Sigma,0}$ к мощности при прямолинейном движении $P_{\Sigma,\infty}$ на том же типе покрытия:

$$K_n = \frac{P_{\Sigma,0}}{P_{\Sigma,\infty}} ,$$

В табл. 2 представлены обработанные результаты проведенного исследования для всех трёх типов покрытий.

Таблица 2 – Результаты экспериментального исследования

—	Прямолинейное движение		Разворот на месте		—
Покрытие	$P_{м,1} / P_{м,2}$, Вт	$P_{Σ,∞}$, Вт	$P_{м,1} / P_{м,2}$, Вт	$P_{Σ,0}$, Вт	K_H
Асфальт	70,1 / 70,1	140,2	386,8 / 390,1	776,9	5,5
Грунтовая дорога	98,1 / 98,9	197,0	373,3 / 371,8	745,1	3,8
Песок	90,5 / 91,0	181,5	358,4 / 350,2	708,6	3,9

На асфальте суммарная механическая мощность при развороте составила 776,9 Вт, тогда как при прямолинейном движении – 140,2 Вт. Таким образом, для разворота с нулевым радиусом получено увеличение мощности в 5,5 раз. На грунтовой дороге опыт показал увеличение потребляемой мощности в 3,8 раз, на песке в 3,9 раза. Отношение K_H однозначно показывает повышенную нагрузку, возникающую при развороте на месте.

На рис. 2 представлено графическое сопоставление результатов исследования.

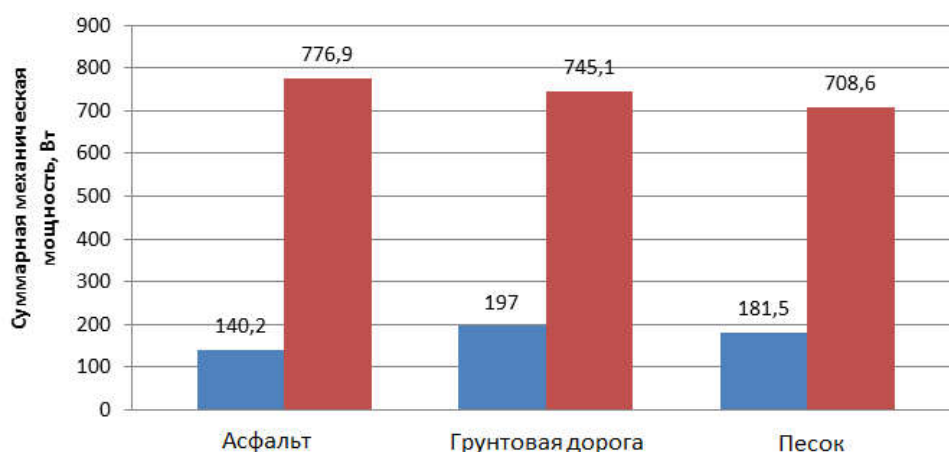


Рисунок 2 – Сопоставление суммарной механической мощности при прямолинейном движении и развороте на месте

Полученные результаты не позволяют выявить однозначную зависимость между мощностью разворота на месте и мощностью прямолинейного движения по исследованным покрытиям. На асфальте, где мощность прямолинейного движения была минимальной среди исследованных покрытий, зафиксирована наибольшая мощность разворота, тогда как на песке эффект обратный. Причиной является иной характер взаимодействия гусеницы с опорной поверхностью. Совершая поперечное перемещение по опорной поверхности, гусеницы деформируются в плане, а в направляющем аппарате возрастает трение катков о реборды траков. На деформируемом основании часть относительного перемещения реализуется за счет сдвига поверхностного слоя, что изменяет общее сопротивление повороту.

Мощности левого и правого приводов в ходе экспериментов практически не различались относительно их среднего значения, на асфальте и грунтовой дороге максимальная разница мощностей составила – 0,4 %, на песке – 1,15%. Данный показатель свидетельствует о достаточно симметричном нагружении бортов в данных условиях. Некоторая разница в потребляемых мощностях может быть вызвана неоднородностью поверхности движения и различием условий взаимодействия гусениц с основанием различием фактического буксования гусениц. Поэтому сопоставление мощностей бортовых приводов может использоваться не только для ограничения нагрузки, но и как косвенный признак несимметричного взаимодействия гусениц с поверхностью.

Для гусеничных машин с отдельным электроприводом бортов мощность разворота с нулевым радиусом необходимо учитывать при выборе тяговых электродвигателей и параметров системы электропитания. Если технологическая операция допускает маневр конечного радиуса или как можно большее количество прямолинейного движения, замена части разворотов на месте плавными поворотами может существенно снизить энергозатраты в целом. Общие принципы повышения энергоэффективности механизмов поворота [7] позволяют рассматривать увеличение радиуса манёвра как возможное направление снижения энергозатрат, требующее отдельной экспериментальной проверки.

Выводы

Экспериментально установлено, что разворот на месте характеризуется повышенными энергозатратами по сравнению с прямолинейным движением исследованной электрической гусеничной платформы. При одинаковой линейной скорости гусениц суммарная механическая мощность при развороте на месте относительно прямолинейного движения на асфальте, грунтовой дороге и песке в соответствующих условиях увеличилась в 5,5; 3,8 и 3,9 раза, соответственно.

Установленный рост потребной мощности подтверждает необходимость учета разворота на месте при выборе компонентов электропривода и оценке энергетического баланса гусеничного шасси. Для снижения эксплуатационных энергозатрат целесообразно ограничивать продолжительность и скорость таких разворотов, а при наличии свободного пространства использовать повороты конечного радиуса.

Список литературы

1. Скобцов И.Г. Влияние типа трансмиссии на энергоёмкость процесса поворота гусеничного трелевочного трактора: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01 / И.Г. Скобцов. – Петрозаводск, 2004. – 173 с.
2. Павлов В.В. Вопросы поворота гусеничной машины на месте / В.В. Павлов // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2011. – № 2(25). – С. 14-17.
3. Падалкин Б.В. Теоретическое исследование потерь в движителе при повороте гусеничной машины / Б.В. Падалкин. // Транспортные системы. – 2021. – № 1 (19). – С. 11-15.

4. Morales J. Power Consumption Modeling of Skid-Steer Tracked Mobile Robots on Rigid Terrain / J. Morales, J. L. Martinez, A. Mandow [et al.] // IEEE Transactions on Robotics. – 2009. – Vol. 25, № 5. – pp. 1098–1108.
5. Меденцев А.Ю. Обзор конструкции и технологии изготовления резиноармированной гусеницы / А.Ю. Меденцев, И.С. Кузнецов. // Агротехника и энергообеспечение. – 2020. – № 4 (29). – С. 49–55.
6. Система регистрации и записи параметров движения гусеничной машины / Д.С. Неверовский, В.Д. Гайдук, С.В. Пичахчи [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2026. – № 2. – С. 106–114.
7. Добрецов Р.Ю. К определению параметров энергоэффективности механизма поворота шасси транспортных и технологических гусеничных машин / Р.Ю. Добрецов, Г.П. Поршневу. // Вестник ПНИПУ. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности. – 2015. – № 1. – С. 42–55.

References

1. Skobtsov I.G. The influence of the transmission type on the energy consumption of the turning process of a tracked skidder caterpillar: dis. ... cand. tech. sci.: 05.21.01 / I.G. Skobtsov. – Petrozavodsk, 2004. – 173 p.
2. Pavlov V.V. Issues of turning a tracked vehicle in place / V.V. Pavlov // Bulletin of the Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI). – 2011. – № 2(25). – pp. 14–17.
3. Padalkin B.V. Theoretical study of losses in the drive mechanism when turning a tracked vehicle / B.V. Padalkin. // Transport Systems. – 2021. – № 1 (19). – pp. 11–15.
4. Power Consumption Modeling of Skid-Steer Tracked Mobile Robots on Rigid Terrain / J. Morales, J. L. Martinez, A. Mandow [et al.] // IEEE Transactions on Robotics. – 2009. – Vol. 25, no. 5. – P. 1098–1108.
5. Medentsev A.Yu. Overview of the design and manufacturing technology of a rubber-reinforced track / A.Yu. Medentsev, I.S. Kuznetsov. // Agrotechnology and Energy Supply. – 2020. – № 4 (29). – pp. 49–55.
6. System for Recording and Logging the Movement Parameters of a Tracked Vehicle / D.S. Neverovsky, V.D. Gaiduk, S.V. Pichakchi [et al.] // Proceedings of the Tula State University. Technical Sciences. – 2026. – № 2. – pp. 106–114.
7. Dobretsov R.Yu. On Determining the Energy Efficiency Parameters of the Turning Mechanism of the Chassis of Transport and Technological Tracked Vehicles / R.Yu. Dobretsov, G.P. Porshnev. // Bulletin of PNIPU. Environmental Protection, Transport, Life Safety. – 2015. – № 1. – pp. 42–55.