

Динамические качества гусеничной машины с комбинированной энергетической установкой и механической трансмиссией при разгоне

© В.А. Корсунский

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

С помощью разработанной методики проведено сравнение динамических качеств гусеничной машины с обычной и с комбинированной энергетической установкой, содержащей двигатель внутреннего сгорания и маховичный аккумулятор энергии. Выполнена оценка влияния параметров комбинированной энергетической установки на динамические качества машины с механической трансмиссией. Установлены факторы, ограничивающие эффективность действия исследуемой установки в процессе разгона гусеничной машины. Полученные результаты позволяют определять законы управления приводом маховика и проводить их оптимизацию.

Ключевые слова: комбинированная энергетическая установка, маховичный аккумулятор энергии, эквивалентная мощность, механическая трансмиссия, рывок скорости, гусеничная машина.

Анализ [1] значений дополнительной мощности, вырабатываемой маховичным аккумулятором энергии (МАЭ), позволяет судить о том, что при неравномерном движении машины с комбинированной энергетической установкой (КЭУ) могут быть обеспечены высокие ускорения, равные или превышающие по значению ускорения легковых автомобилей. При этом в отличие от автомобилей процесс разгона гусеничной машины (ГМ) может происходить при заданном постоянном ускорении в любой момент времени разгона, однако он не может превышать предельного ускорения по сцеплению j_ϕ . Для одиночной машины, двигающейся без прицепа, предельное ускорение по сцеплению определяется по формуле [2]

$$j_\phi = (D_\phi - f_c)g, \quad (1)$$

где $D_\phi = (P_\phi - R)/G_{ГМ}$ — предельный по сцеплению динамический фактор машины (P_ϕ — сила тяги по сцеплению; R — равнодействующая сил сопротивления внешней среды; $G_{ГМ}$ — вес ГМ); f_c — общий (суммарный) коэффициент сопротивления движению; g — ускорение силы тяжести.

Для шоссе, где могут достигаться максимальные скорости машины, $j_\phi = 6,5 \dots 7,5 \text{ м/с}^2$ при угле подъема местности $\alpha = 0$.

Отметим, что мощность, вырабатываемая маховиком при времени разрядки 5 ... 20 с, вызывает опасения в возможности ее реализации ввиду ограничения по прочности гидрообъемных, электрических или другого типа передач привода МАЭ и трансмиссии, даже если ускорения ГМ при этом будут меньше предельных по сцеплению [1].

Ниже приведена методика расчета для случая задания постоянного ускорения разгона ГМ в данном интервале изменения скорости. Характер движения машины принят равноускоренным с линейной зависимостью скорости от времени. Эта методика пригодна также для случая кратковременного увеличения скорости машины, т. е. ее рывка или «броска» с целью маневрирования. При этом считается, что кратковременный рывок ГМ начинается с некоторой известной и установившейся с начала этого процесса скорости. Однако верхний предел скорости рывка ограничен прочностью привода МАЭ и трансмиссии машины [1].

На рис. 1 представлена кинематическая схема ГМ с КЭУ и механической трансмиссией. На входном валу 3 механической трансмиссии 4 параллельно основному двигателю (ДВС) 5 машины устанавливается МАЭ 1 с гидрообъемно-механическим приводом (ГОМП) 2. ГОМП содержит три гидравлические связанные гидрообъемные передачи (ГОП), каждая из которых состоит из насоса 6 и гидромотора 7, соединенных трубопроводами и приводимых в движение от ДВС через фрикцион 8 и муфту 9 привода МАЭ. Через механическую трансмиссию КЭУ связана с ведущими колесами 10 машины. Для уменьшения аэродинамических потерь маховик помещен в камеру 11 с небольшим вакуумом. Электромагнитная муфта 12 служит для консервации энергии при длительной стоянке машины.

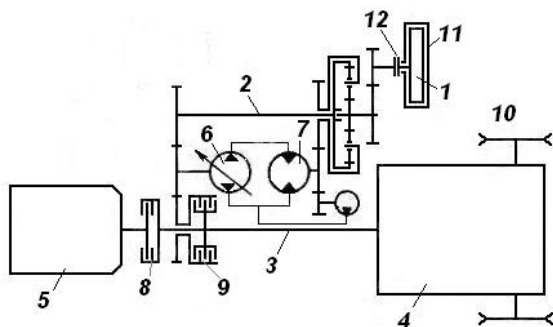


Рис. 1. Кинематическая схема машины с КЭУ и механической трансмиссией

Для количественных расчетов примем следующие предпосылки и допущения:

- 1) вес ГМ $G_{ГМ} = 402,2$ кН;

- 2) максимальная скорость ГМ на шоссе $v_{\max} = 61$ км/ч;
 - 3) разгон ГМ происходит на шоссе с $f_c = 0,04$ без подъемов и уклонов ($\alpha = 0$);
 - 4) сопротивлением воздуха пренебрегаем;
 - 5) свободная мощность ДВС $N_d = 485$ кВт (660 л. с.);
 - 6) интервал изменения скорости ГМ при разгоне разбиваем на i участков по числу передач в коробке (трансмиссии);
 - 7) коэффициент δ_i условного приращения массы машины на i -й передаче в коробке принимаем постоянным;
 - 8) общий КПД машины η_o , КПД привода МАЭ η_m , КПД коробки передач $\eta_{к.п}$ и КПД гусеничного движителя $\eta_{г.д}$ в интервале изменения скорости на i -й передаче считаем постоянными и равными их средним значениям;
 - 9) в начале разгона ГМ маховик имеет полный запас энергии;
 - 10) маховик вступает в работу в начале разгона ГМ. При этом пренебрегаем небольшим интервалом изменения скорости ГМ, в котором возможно обеспечение заданного ускорения за счет энергии основного ДВС, без использования МАЭ;
 - 11) время, затрачиваемое на переключение передач, не учитываем.
- Потребный для разгона динамический фактор D при заданном значении ускорения j определяется по формуле, аналогичной формуле (1):

$$D = \delta_i j / g + f_c. \quad (2)$$

Сила тяги по двигателю [2]

$$P_d = DG_{ГМ}. \quad (3)$$

Общий КПД машины при разгоне

$$\eta_o = \eta_{м.ср} \eta_{к.п} \eta_{б.р} \eta_{г.д}, \quad (4)$$

где $\eta_{м.ср}$ — средний КПД привода МАЭ с учетом всех потерь в аккумулирующем модуле; $\eta_{б.р}$ — КПД бортового редуктора.

Обозначим через v_n и v_k начальную и конечную скорости машины на данной передаче в трансмиссии (коробке).

Используемые значения параметров приведены в табл. 1.

Общая мощность, развиваемая на входном валу трансмиссии, кВт (при v , м/с),

$$N = 10^{-3} DGv / \eta_o, \quad (5)$$

где v — текущая скорость ГМ.

Значения параметров для расчета

Параметр	Номер передачи в коробке						
	1	2	3	4	5	6	7
$v_{нi}, v_{кi}$, км/ч	4,46 – 7,45	8,32 – 13,9	13,9 – 17,5	17,5 – 21,9	21,9 – 30,1	30,1 – 41,0	41,0 – 61,0
δ_i	3,812	1,774	1,560	1,430	1,322	1,264	1,230
$\eta_{к.п}$	0,970	0,975	0,973	0,973	0,972	0,993	1,000
$\eta_{г.д}$	0,940	0,907	0,875	0,850	0,825	0,800	0,750
η_0	0,700	0,679	0,653	0,635	0,616	0,610	0,576

Обозначим $N_{нi}$ — мощность при начальной скорости $v_{нi}$ на i -й передаче и $N_{кi}$ — мощность при конечной скорости $v_{кi}$ на i -й передаче, которые определяются по формуле (5).

Тогда мощность, отбираемая от маховика,

$$N_M = N - N_D. \quad (6)$$

Время разгона ГМ на данном интервале изменения скорости $[v_{нi}, v_{кi}]$ с учетом принятых допущений

$$t_i = t_k - t_n = (v_k - v_n)/j, \quad (7)$$

где t_n, t_k — время начала и окончания разгона на i -й передаче.

Общее время разгона ГМ до конечной скорости v_k i -й передачи

$$t_{0i} = \sum_{i=1}^{n_i} t_i, \quad (8)$$

где n_i — номер передачи.

Общее время разгона ГМ до максимальной скорости v_{max}

$$t_0 = v_{max}/j. \quad (9)$$

Путь разгона ГМ на i -й передаче в интервале скоростей $[v_{ни}, v_{ки}]$

$$S_i = 0,5(v_{ни} + v_{ки})t_i. \quad (10)$$

Общий путь разгона ГМ на i -й передаче до скорости $v_{ки}$ равен

$$\sum_{i=1}^{n_i} S_i.$$

Общий путь разгона ГМ до скорости v_{\max}

$$S_o = \sum_{i=1}^{n_i} S_i, \quad (11)$$

где n – общее число передач в ступенчатой коробке (трансмиссии).

Поскольку на первой передаче обычно обеспечиваются достаточно высокие значения ускорений машины, целесообразно использовать МАЭ со второй передачи.

Тогда энергия, расходуемая МАЭ, начиная со второй передачи, определяется линейной зависимостью от t при $j = \text{const}$:

$$E_{Mi} = 0,5(N_{M.H} + N_{M.K})(t_k - t_H)/\eta_{M.CP}, \quad \text{Дж.} \quad (12)$$

Общая энергия, расходуемая МАЭ при разгоне до v_{\max} ,

$$E_{M\Sigma} = \sum_{i=2}^n E_{Mi}. \quad (13)$$

Коэффициент расхода энергии МАЭ (коэффициент разрядки) при разгоне ГМ до конечной скорости v_{Ki} движения на i -й передаче с учетом предыдущих передач, кроме первой, в соответствии с [3]

$$\xi_{p i} = \sum_{i=2}^n E_{Mi} / E_{M \max}, \quad (14)$$

где $E_{M \max}$ — максимальная энергоемкость маховика, определяемая в кинетических энергиях (кЭн) машины, движущейся с максимальной скоростью [4].

Общий коэффициент расхода энергии МАЭ при разгоне ГМ до скорости v_{\max}

$$\xi_{p\Sigma} = E_{M\Sigma} / E_{M \max}. \quad (15)$$

Отметим, что значение $\xi_{p\Sigma}$, умноженное на 100, даст расход в процентах от полной энергии МАЭ.

Кинетическая энергия машины, движущейся с максимальной скоростью,

$$E_{ГМ \max} = 0,5(G_{ГМ}/g)v_{\max}^2 = 5,89 \text{ МДж} = 1 \text{ кЭн.}$$

Тогда, задавая относительной энергоемкостью $E_0 = 3$ кЭн, получим максимальную энергоемкость маховика $E_{M \max} = 17,65$ МДж.

Результаты расчетов по формулам (1) – (15) для постоянного ускорения ($j = 3$ м/с²) при разгоне машины во всем интервале скоростей приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчетов

Параметр	Номер передачи в коробке						
	1	2	3	4	5	6	7
$v_{н>},$ $v_{к>},$ м/с	1,24...2,07	2,31...3,85	3,85...4,86	4,86...6,08	6,08...8,36	8,36...11,4	11,4...16,9
D	1,2	0,583	0,517	0,477	0,444	0,427	0,416
$N_{нi>},$ кВт	855	798	1226	1468	1763	2354	3311
$N_{кi>},$ кВт	1427	1330	1548	1837	2424	3210	4909
$N_{M,нi>},$ кВт	0	313	741	983	1278	1869	2826
$N_{M,кi>},$ кВт	0	845	1063	1352	1939	2715	4425
t_i, c	0,277	0,513	0,337	0,407	0,760	1,013	1,830
$\Sigma t_i, c$	0,277	0,513	0,850	1,257	2,017	3,030	4,860
$S_i, м$	5,97	6,00	12,92	13,44	9,5	9,75	7,73
$\Sigma S_i,$ м	5,97	11,97	24,89	38,33	47,83	57,58	65,31
$E_{Mi>},$ МДж	0	0,349	0,358	0,559	1,438	2,732	7,805
$\Sigma E_{Mi>},$ МДж	0	0,349	0,707	1,266	2,704	5,436	13,241
$\xi_{p\Sigma}$	0	0,02	0,04	0,07	0,153	0,308	0,75
<i>Примечание.</i> Для всех передач $N_{M \max} = 4\ 425$ кВт, $t_0 = 4,86$ с, $S_0 = 65,31$ м, $E_{M\Sigma} = 13,24$ МДж, $\xi_{p\Sigma} = 0,239$ (23,9 %).							

Полученные данные свидетельствуют о том, что использование МАЭ на ГМ массой $41 \cdot 10^3$ кг при свободной мощности основного ДВС 485 кВт (660 л.с.) обеспечивает весьма интенсивный разгон машины, начиная со второй передачи ($v_{н} = 2,31$ м/с), до скорости 61 км/ч при постоянном ускорении $j = 3$ м/с² за время $t_0 = 4,86$ с и путь разгона $S_0 = 65,31$ м. Расход энергии маховика составляет 75 % $E_{M \max}$, т. е. при 75%-ном расходе энергии МАЭ можно осуществить полный разгон машины, начиная со второй передачи, до скорости 61 км/ч с постоянным ускорением $j = 3$ м/с².

Однако для реализации полученных качеств имеются серьезные препятствия. Прежде всего, возникает сомнение в психологических возможностях водителя осуществить все необходимые действия за короткие промежутки времени в реальных условиях разгона ГМ даже в случае использования автоматических устройств. Более существенным препятствием является необходимость передать через привод МАЭ мощность 4 425 кВт, а через трансмиссию — 4 909 кВт на скорости движения машины, близкой к максимальной.

Ограниченные габариты трансмиссионных отделений ГМ накладывают жесткие требования на размеры ГОП. Благодаря параллельному включению в регулируемую ветвь привода МАЭ по представленной на рис. 1 схеме трех ГОП, имеющих между собой гидравлическую связь, можно уменьшить общие габариты и вес привода МАЭ за счет более плотной компоновки аккумулирующего модуля. При этом использование в приводе МАЭ гидромашин Bosch Rexroth, состоящих из трех регулируемых гидронасосов A4VSG и трех нерегулируемых гидромоторов A4FM, позволит развить суммарную мощность 258 кВт. Тогда, если учитывать, что на второй передаче в трансмиссии регулируемая ветвь привода передает не более половины всей мощности, получим общую мощность, передаваемую двухпоточным приводом МАЭ, равную 516 кВт.

Допустив возможную 100%-ную кратковременную (в течение не более 3 с) перегрузку по давлению, окончательно получим мощность, передаваемую приводом МАЭ, равную 1 032 кВт. Суммарная кратковременная мощность привода, передаваемая трансмиссией ГМ, равна 1 517 кВт (вместо 4 425 кВт при постоянном ускорении $j = 3 \text{ м/с}^2$). Без перегрузки привода МАЭ суммарная мощность, передаваемая трансмиссией, составит 1 001 кВт.

На рис. 2 графически представлено изменение мощности, передаваемой приводом МАЭ, при $j = 3 \text{ м/с}^2$ и 75%-ной разрядке МАЭ. Точкой на оси ординат отмечена мощность 1 032 кВт, предельная по прочности привода для данного значения j и определяющая максимально возможную скорость конца разгона.

Разгон ГМ с ускорением 3 м/с^2 до максимальной скорости 61 км/ч невозможен. Максимально допустимая скорость разгона машины лимитируется не запасом энергии

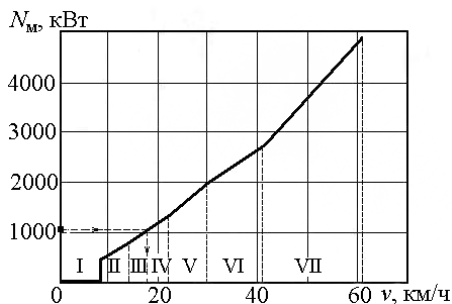


Рис. 2. Изменение мощности, передаваемой приводом МАЭ: I — VII — номера передач в коробке (трансмиссии)

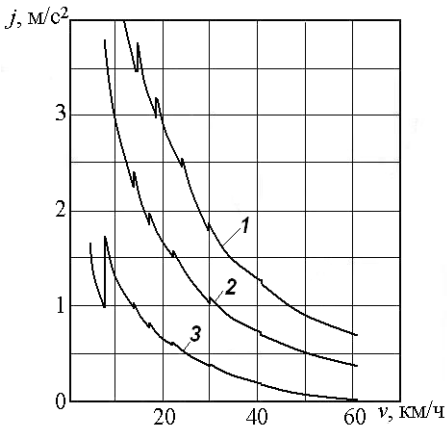


Рис. 3. Изменение ускорения для различных вариантов разгона машины: 1 — $N = 1517$ кВт = const; 2 — $N = 1001$ кВт = const (без перегрузки ГОП); 3 — с использованием только мощности ДВС $N_d = 485$ кВт

вероятность перегрузок ГОП и механических ветвей привода МАЭ возрастает.

По формулам (2) и (5), задаваясь конечной скоростью разгона (или рывка) v_k , можно вычислить допустимое ускорение $j = \text{const}$ при $N = 1517$ кВт и $N_m = 1032$ кВт.

Результаты расчетов ГМ массой 41 т на грунте с $f_c = 0,04$ приведены на рис. 3.

Для определения времени разгона от нулевой скорости до v_k используется зависимость

$$t_{\Sigma} = v_k/j.$$

Разгон до максимальной скорости 61 км/ч характеризуется предельным по прочности (при 100%-ной перегрузке) ГОП постоянным ускорением $j = 0,706$ м/с² и общим временем разгона $t_0 = 24$ с.

Такие результаты без МАЭ можно получить только при установке на ГМ основного ДВС с эффективной мощностью 1517 кВт, что соответствует удельной мощности ГМ 37 Вт/кг, сопоставимой с энерговооруженностью легковых автомобилей среднего класса.

Рывок скорости ГМ при ускорении $j = 3$ м/с² и принятом ограничении мощности по прочности привода МАЭ в соответствии с графиком на рис. 2 можно осуществить только до скорости 18 км/ч. Превышение этой скорости может привести к поломке привода МАЭ или трансмиссии ГМ.

маховика, а прочностью привода МАЭ и трансмиссии и составляет приблизительно 18 км/ч (см. рис. 2).

Отметим, что изменение условий движения незначительно влияет на конечные результаты, так как f_c в формуле (2) имеет меньший удельный вес, чем первое слагаемое, определяемое ускорением разгона.

Наиболее вероятными следует считать режимы кратковременного увеличения ускорения ГМ в целях резкого изменения скорости ГМ за короткий промежуток времени, т. е. рывка скорости для улучшения маневрирования, чего не имеют ГМ без МАЭ. С уменьшением времени процесса вероятности перегрузок ГОП и механических ветвей привода МАЭ возрастает.

Следовательно, рывок скорости машины с довольно большими ускорениями возможен, но только на сравнительно малых скоростях движения и за малые промежутки времени.

Отметим, что при еще большем ограничении передаваемой мощности по прочности или при снижении N и N_M против принятых соответствующим регулированием привода МАЭ, можно вести разгон по закону $N_M = \text{const}$ (при $N = \text{const}$) с уменьшением ускорения j по мере роста скорости.

При этом в большей степени увеличатся значения времени разгона на высших передачах, имеющих наибольший удельный вес в общем времени разгона машины. Очевидно, что при законе разгона машины с $N = \text{const}$ по сравнению с законом $j = \text{const}$ и одинаковых мощностях, передаваемых трансмиссией, на всех скоростях, меньших v_{max} , будет обеспечено более высокое ускорение, чем при $j = \text{const}$. Тогда разгонные качества ГМ при $N = \text{const}$ улучшатся, включая и высшие передачи.

Отметим, что система регулирования ГОП привода МАЭ должна непременно предусматривать ограничение верхнего предела углового замедления вращения маховика по времени при отборе энергии, так как это определяет предельный момент и мощность разрядки МАЭ.

Из изложенного можно сделать следующие выводы:

1) эффективность действия КЭУ при использовании энергии маховика в случае разгона ГМ зависит от прочности привода МАЭ и трансмиссии ГМ;

2) практическая реализация повышения с помощью КЭУ энерговооруженности ГМ массой 41 т до предела, обеспечивающего интенсивный разгон и соответствующего эквивалентной номинальной мощности ДВС около 1500 кВт, затруднено. Необходимы дополнительные исследования, направленные на повышение прочности деталей и узлов машины;

3) достижение с помощью МАЭ мощности, эквивалентной 1000-кВт силовой установке, для ГМ массой 41 т в значительной мере уменьшает эти трудности и способствует реальному воплощению КЭУ;

4) введение понятия эквивалентной мощности ДВС позволяет говорить о сравнительном критерии — удельной мощности (Вт/кг) ГМ с КЭУ при разгоне.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Забавников Н.А., Корсунский В.А., Герасимов А.Н. *Динамика гусеничной машины с маховичным аккумулятором энергии: Учеб. пособие.* Москва, МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1987, 44 с.

- [2] Забавников Н.А. *Основы теории транспортных гусеничных машин*. Москва, Машиностроение, 1975, 430 с.
- [3] Корсунский В.А. Повышение эффективности мобильных роботов путем использования дополнительного источника энергоснабжения — маховичного аккумулятора энергии. *Наука и образование*. 2013, № 5. DOI: <http://dx.doi.org/10.7463/0513.0566233>.
- [4] Корсунский В.А. Приемистость транспортного средства с комбинированной энергетической установкой. *Известия вузов. Сер. Машиностроение*, 1984, № 7, с. 100 — 102.

Статья поступила в редакцию 10.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Корсунский В.А. Динамические качества гусеничной машины с комбинированной энергетической установкой и механической трансмиссией при разгоне. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 10. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/transport/983.html>

Корсунский Владимир Александрович родился в 1950 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1976 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Многоцелевые гусеничные машины и мобильные роботы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 60 научных работ в области гусеничных машин специального назначения и мобильных роботов. e-mail: vakormgtu@mail.ru