



ЛЕОНОВ

Игорь Владимирович
доктор технических наук,
профессор
кафедры «Теория
механизмов и машин»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Энергетический анализ цикла грузоподъемной машины

И.В. Леонов

Увеличение расхода энергии машин на неустановившихся режимах требует создания энергетических математических моделей и на их основе выработки рекомендаций по повышению экономичности. Несомненно, причинами снижения экономичности транспортных машин являются изменения скорости и нагрузки, отклонения которых от оптимального значения и вызывает рост потерь энергии. Другой причиной повышения потерь энергии является процесс принудительного торможения транспортных машин с потерей кинетической энергии при необходимости их остановки. Разработанная энергетическая модель позволяет провести моделирование экономических характеристик машин и выработать рекомендации по повышению экономичности машин путем выбора оптимальных параметров и рекуперации энергии торможения.

Ключевые слова: грузоподъемные машины, расход энергии, торможение, рекуперация энергии, математическая модель, время разгона, улучшение КПД и экономичности, оптимальная мощность.

The delivery vehicles power consumption growth under unsteady operation modes demands a creation of mathematical models and a development of recommendations on their basis. Undoubtedly, the reasons of delivery vehicles profitability decrease are changes of speed and load, which deviations from the optimum value cause an energy losses growth. The other reason of an energy losses growth is the process of compulsory braking of delivery vehicles with loss of kinetic energy while retarding. The developed model allows to perform simulation of characteristics of vehicles with hybrid power-plants and to develop recommendations for vehicles with a flywheel energy accumulator by choosing optimum parameters and recuperative braking.

Keywords: delivery vehicles, power consumption, braking, energy recuperation recovery, mathematical model, acceleration time, efficiency improvement, optimum power.

Значительную часть времени подъемно-транспортные машины работают на неустановившихся режимах движения «пуск – останов». Увеличение расхода энергии машинами на этих режимах требует проведения энергетического анализа для выработки рекомендаций по повышению экономичности. Несомненно, что причинами снижения экономичности являются колебания скорости и нагрузки, отклонения которых от расчетного значений и вызывает рост потерь энергии. Другая причина роста потерь энергии — процесс принудительного торможения машин при необходимости их остановки.

Энергетический анализ [1] служит основой оптимального выбора параметров грузоподъемной машины по критериям динамических и эко-

номических качеств. За критерием динамических качеств часто принимают время разгона машины $\tau_{\text{разг}}$. КПД машины используется в качестве критерия экономичности расхода энергии на установившихся режимах, на которых существует однозначная связь между удельным расходом энергии и КПД [1]. Заманчиво применять аналогичную методику на неустановившихся режимах работы, предложив для оценки экономических и динамических качеств машин комбинацию режимов «пуск — останов».

Для проведения энергетического анализа выполняется идеализация цикла «разгон — торможение», которая состоит в допущении мгновенности изменения нагрузки и постоянного значения приведенных момента инерции J_{Σ} и моментов сил M на отдельных участках разгона и торможения (рис. 1). По сравнению с другими видами нагружения идеализация цикла имеет следующие преимущества:

- 1) кроме расчетов циклового КПД идеализация цикла работы позволяет оценить экстремальные динамические качества и сравнить варианты машин при одинаковых максимальных динамических нагрузках;
- 2) позволяет оценить динамические и экономические качества машины при изменении

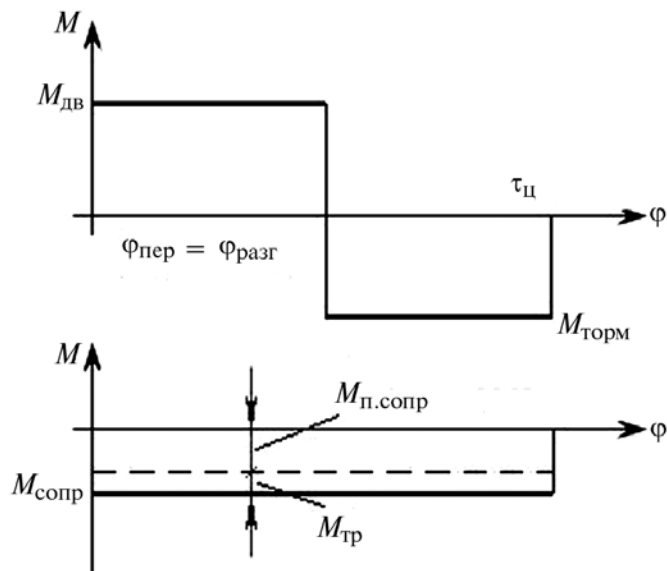


Рис. 1. Изменение приведенных моментов двигателя и сил сопротивления в идеализированном цикле «разгон — торможение»:

$\varphi_{\text{разг}}, \varphi_{\text{торм}}$ — угловые пути разгона и торможения;
 $\varphi_{\text{ц}} = \varphi_{\text{разг}} + \varphi_{\text{торм}}$ — путь за цикл «пуск — останов»

конструктивных параметров на ранней стадии проектирования при одинаковых условиях нагружения.

При пренебрежении изменением потенциальной энергии и условия выключения двигателя в процессе торможения машины или переключения его в режим электрогенератора уравнение энергетического баланса работ за цикл с рекуперацией энергии имеет следующий вид:

$$[A_{\text{дв}}]_{\text{ц}} = [A_{\text{дв}}]_{\text{разг}} = |A_{\text{п.сопр}}| + A_{\text{пот}} + A_{\text{рек.ц}}, \quad (1)$$

где $[A_{\text{дв}}]_{\text{ц}}$ — работа двигателя; $A_{\text{п.сопр}}$ — работа сил полезного сопротивления; $A_{\text{пот}}$ — величина потерь энергии; $A_{\text{рек.п}}$ — рекуперированная работа.

Под работой рекуперации энергии $A_{\text{рек}}$ понимается преобразование ее и накопление аккумулярующим устройством в процессе торможения и использование в период разгона и на другие полезные цели. Поэтому работу по накоплению энергии $A_{\text{рек}}$, обычно теряемой при торможении, следует признать «полезной» [2]. Критериями, позволяющими оценить экономичность расхода энергии машины могут служить:

- цикловой КПД

$$\eta_{\text{ц}} = \left(\frac{A_{\text{п}}}{A_{\text{дв}}} \right)_{\text{ц}};$$

- доля потерь

$$d_{\text{пот}} = \left(\frac{A_{\text{пот}}}{A_{\text{дв}}} \right)_{\text{ц}};$$

- доля рекуперации потерянной энергии

$$d_{\text{рек}} = \frac{[A_{\text{рек}}]_{\text{ц}}}{[A_{\text{дв}}]_{\text{разг}}},$$

В цикле установившегося движения цикловые КПД $\eta_{\text{ц}}$ и доля потерь $[d_{\text{пот}}]_{\text{ц}}$ не являются независимыми параметрами, а однозначно связаны между собой как средние значения их функций за цикл:

$$\eta_{\text{ц}} + [d_{\text{пот}}]_{\text{ц}} = 1.$$

В исследовании проводится оценка экономичности неустановившегося цикла по сравнению с установившимся режимом, в котором затраты на накопление кинетической энергии за цикл отсутствуют $\Delta T = 0$, а потери энергии связаны с трением в кинематических парах механизмов и торможением.

Цикл «пуск – останов» начинается разгоном с накоплением кинетической энергии ΔT машины за счет избыточной работы двигателя по сравнению с работой сил сопротивления:

$$\Delta T_{\max} = \int_0^{\varphi_{\text{разг}}} (M_{\text{дв}} + M_{\text{сопр}}) d\varphi = \frac{1}{2} J \omega_{\max}^2, \quad (2)$$

где $M_{\text{сопр}} = M_{\text{п.сопр}} + M_{\text{тр}}$ – общий момент сопротивления, включающий приведенный момент сил полезного сопротивления и сил трения. Полагая моменты полезного и вредного сопротивлений отрицательными величинами, из уравнения (2) изменения кинетической энергии можно определить значение максимальной скорости в цикле

$$\omega_{\max} = \sqrt{\left[\frac{2\Delta T_{\max}}{J_{\Sigma}} \right]}$$

и время разгона из неподвижного состояния с постоянным значением ускорения

$$\tau_{\text{разг}} = \frac{\omega_{\max}}{\varepsilon_{\text{разг}}},$$

где $\varepsilon_{\text{разг}} = \frac{[M_{\text{дв}} + M_{\text{сопр}}]}{J_{\Sigma}}$ – угловое ускорение,

имеющее постоянное значение при разгоне. Минимально возможное время разгона $[\tau_{\text{разг}}]_{\min}$ соответствует разгону машины без нагрузки при $M_{\text{п.сопр}} = 0$ с максимальным ускорением

$$[\varepsilon_{\text{разг}}]_{\max} = \frac{(M_{\text{дв}} + M_{\text{тр}})}{J_{\Sigma}}.$$

Торможение машины вызывает дополнительные потери энергии, если не проводится рекуперация энергии:

$$A_{\text{пот}} = \int_0^{\varphi_{\text{п}}}} M_{\text{тр}} d\varphi + \int_{\varphi_{\text{разг}}}^{\varphi_{\text{п}}} M_{\text{торм}} d\varphi.$$

Анализируя уравнение баланса работ (1), следует отметить, что вычисление КПД по нему справедливо не только на установившемся движении, но применимо и к циклу неустановившегося движения, в котором изменение кинетической энергии и суммарная работа за цикл, выражающаяся площадями зависимостей моментов сил, равны нулю (см. рис. 1):

$$\eta_{\text{ц}} = \frac{(A_{\text{дв}})_{\text{разг}} - A_{\text{п.цикл}}}{(A_{\text{дв}})_{\text{разг}}}.$$

При принятых допущениях идеализации приведенных моментов сил уравнения затраченных и потерянных в цикле «пуск – останов» работ принимают следующий вид:

$$A_{\text{дв.разг}} = M_{\text{дв}} \varphi_{\text{разг}};$$

$$A_{\text{п.сопр}} = M_{\text{п.сопр}} \varphi_{\text{п}}.$$

Поэтому значение циклового КПД «пуск – останов» без рекуперации энергии торможения, учитывающего общие потери работ на трение и торможении, можно представить как

$$[\eta_{\text{ц}}]_{\text{без рек}} = \frac{|M_{\text{п.сопр}}| \varphi_{\text{п}}}{M_{\text{дв}} \varphi_{\text{разг}}}.$$

При проведении рекуперации энергии торможения значение циклового КПД увеличивается на долю рекуперированной энергии:

$$[\eta_{\text{ц}}]_{\text{с рек}} = [\eta_{\text{ц}}]_{\text{без рек}} + d_{\text{рек}}.$$

Используя для определения КПД цикла «пуск – останов» допущение квазистационарности, будем считать, что на неустановившемся режиме полезно затраченная работа в цикле приближенно может быть оценена по параметрам установившегося движения на одинаковом пройденном пути. Для вывода общего выражения КПД цикла «разгон – торможение» $\eta_{\text{ц}}$ выделим из суммарного приведенного момента M_{Σ} отдельные составляющие моменты: двигателя $M_{\text{дв}}$, торможения $M_{\text{торм}}$ и сопротивления $M_{\text{сопр}}$, которые на отдельных участках имеют постоянные значения и мгновенно меняются в мгновение переключения $\varphi_{\text{разг}} = \varphi_{\text{пер}}$ с разгона на торможение. Экономичность расхода энергии в цикле «пуск – останов» оценивается с по-

мощью общего КПД за цикл. Поскольку из момента сопротивления можно выделить потери на трение, оцениваемые обычным механическим КПД на установившемся режиме, то с учетом потерь на трение и торможение получим

$$(\eta_{\text{общ}})_{\text{ц}} = \eta_{\text{ц}} \eta_{\text{мех}}$$

где $\eta_{\text{мех}}$ — механический КПД.

Таким образом, общий КПД на неустановившемся цикле «пуск — останов» равен произведению механического КПД, учитывающего как обычно потери на трения, на КПД цикла «разгон — торможение», учитывающего дополнительные потери кинетической энергии при торможении.

В качестве примера рассмотрим упрощенную фракционную модель расчета КПД в цикле «пуск — останов» при условии значительного превышения момента торможения $M_{\text{торм}}$ над другими $M_{\text{торм}} > M_{\text{дв}} > M_{\text{сопр}}$. Учитывая, что при торможении без рекуперации энергии накопленная кинетическая энергия ΔT_{max} будет полностью потеряна, то в качестве кинетических потерь в идеализированном цикле можно принять долю работы сил инерции, потраченную на создание кинетической энергии машины при разгоне. Последнюю можно представить как избыточную работу двигателя в виде работы избыточного момента двигателя при разгоне $M_{\Sigma \text{разг}}$ по сравнению с установившимся режимом [3]:

$$M_{\Sigma \text{разг}} = M_{\text{дв}} + M_{\text{сопр}},$$

которая при разгоне идет на накопление кинетической энергии

$$A_{\text{ин}} = \Delta T_{\text{max}} = \int_0^{\varphi_{\text{разг}}} M_{\Sigma} d\varphi = M_{\Sigma} \varphi_{\text{разг}}.$$

Таким образом, при резком торможении доля кинетических потерь будет равна доле работы сил инерции на создание кинетической энергии машины, которую при разгоне можно представить в виде отношения

$$d_{\text{ин}} = \frac{\Delta T_{\text{max}}}{(A_{\text{дв}})_{\text{разг}}}.$$

Проведенные расчеты динамических и экономических параметров машины при резком торможении без рекуперации энергии позволяют представить зависимость КПД цикла «пуск — останов» в следующем виде:

$$\eta_{\text{ц}} = \frac{(\int M_{\text{дв}} d\varphi - \int M_{\Sigma} d\varphi)_{\text{ц}}}{(\int M_{\text{дв}} d\varphi)_{\text{ц}}} = 1 - \frac{M_{\Sigma}}{M_{\text{дв}}}.$$

На рисунке 2 показаны зависимости динамических и экономических свойств цикла «пуск — останов» без рекуперации энергии от коэффициента загрузки, представляющего собой отношение модулей моментов сопротивления и двигателя:

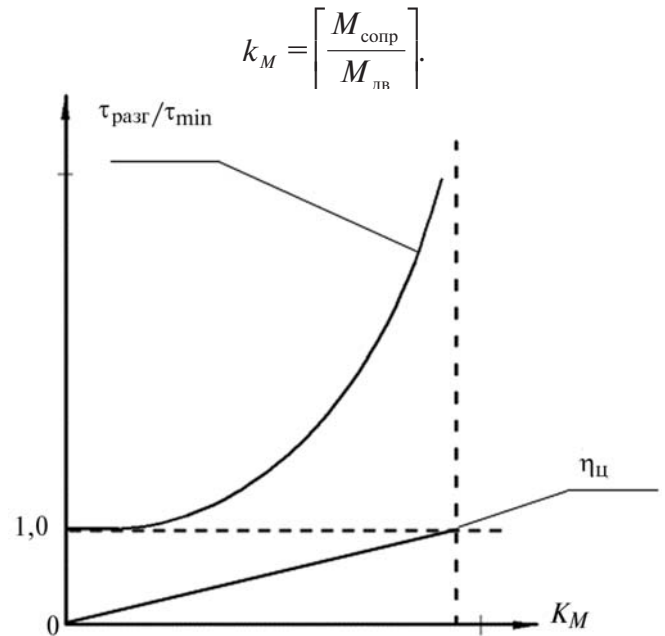


Рис. 2. Зависимости динамических свойств и КПД машины в цикле «пуск — останов» без рекуперации энергии

Необходимый момент двигателя при разгоне в идеализированном цикле можно представить в виде суммы момента сопротивления на установившемся режиме и необходимого динамического момента, вызывающего ускорение,

$$M_{\text{дв}} = |M_{\text{сопр}}| + M_{\text{дин}},$$

где $M_{\text{дин}} = \varepsilon_{\text{разг}} J_{\Sigma} = \frac{\omega_{\text{max}} J_{\Sigma}}{\tau_{\text{разг}}}$ — момент динамической нагрузки.

Выражая мощность через моменты, получим удобное приближенное выражение для выбора

мощности двигателя $W_{дв}$ в идеализированном цикле «пуск – останов» [4] с заданными через $\tau_{разг}$ динамическими свойствами:

$$W_{дв} = M_{дв} \omega_{max} = \omega_{max} \left[M_{п.сопр} + \frac{\omega_{max} J_{\Sigma}}{\tau_{разг}} \right].$$

Представленное выражение позволяет выразить отношение мощностей или моментов сопротивления и двигателя и связать его с КПД идеализированного цикла «разгон – торможение» [4]:

$$[\eta]_{без рек} = (1 - [\omega_{max} J_{\Sigma} / (M_{дв} \tau_{разг})]) \eta_{мех}.$$

Выводы

1. Динамическая модель грузоподъемной машины с жесткими звеньями, полученная из энергетического анализа идеализированного цикла работы машины, наиболее простая, но дает достаточно точное решение при выборе основных параметров машины, например, мощности двигателя и передаточного отношения по критериям быстродействия и экономичности расхода энергии в переходных режимах.

2. Применение рекуперации энергии торможения позволяет увеличить цикловой КПД грузоподъемной машины до величины механического КПД практически без снижения ее динамических качеств. Существуют и другие пути повышения экономичности. Например, изменение «мгновения переключения» с разгона на торможение и уравнивание рабочих сил в машине и путем снижения номинальной мощности двигателя.

3. Изменениями потенциальной мощности при деформации упругих уравнивающих устройств [5], реализуемой в работе внутри

цикла, можно добиться повышения циклового КПД путем снижения номинальной мощности двигателя. Сущность этого явления состоит в том, что на отдельных участках движения (в частности при разгоне машины) потенциальная энергия может суммироваться с работой двигателя, снижая ее необходимое для движения значение. Преднамеренное создание запаса потенциальной энергии в период отсутствия полезной нагрузки или при торможении, наоборот, позволяет дополнительно нагрузить двигатель при отсутствии полезной нагрузки. Снижение пиковой нагрузки позволяет использовать двигатель меньшей номинальной мощности и снизить общий расход энергии.

4. Режим холостого хода машины, характеризующийся отсутствием полезной мощности двигателя и в котором энергия расходуется на трение, поддержание теплового состояния и скорости вращения, имеет наихудшие из всех режимов работы экономические показатели. Чем ближе к нулевому значению коэффициент загрузки K_M двигателя, равный отношению эксплуатационной мощности к номинальной, тем более резко возрастает удельный расход энергии или топлива на единицу произведенной работы любым двигателем.

Литература

1. Левитский Н.И. Теория механизмов и машин. М.: Наука, 1979. 420 с.
2. Леонов И.В. Теория механизмов и машин. М.: Высшее образование, 2009. 239 с.
3. Барбашов Н.Н., Леонов И.В. Выбор оптимальной мощности машины с гибридными двигателями // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2010. № 4.
4. Барбашов Н.Н., Леонов И.В. Улучшение характеристик машин с маховичным аккумулятором энергии // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2010. № 4.
5. Гулиа Н.В. Инерция. М.: Наука, 1982. 152 с.

Статья поступила в редакцию 02.02.2012