

Н. Н. Барбашов, И. В. Леонов

**ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ
ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ
ГИБРИДНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ**

Проведено исследование математической модели гибридного автомобиля, оснащенного ДВС и обратимыми электродвигателями. Показаны экономические преимущества данных машин. Даны рекомендации по выбору мощности разгонных электродвигателей.

E-mail: dm_leonov.mail.ru

Ключевые слова: *двигатели внутреннего сгорания, расход топлива, гибридная силовая установка, проектирование, разгон, торможение, рекуперация энергии, моделирование, цикловой КПД.*

Значительную часть времени современные машины работают с чередованием разгона, кратковременного установившегося режима и торможения. Наиболее неблагоприятным во всех отношениях случаем работы машины является идеализированный неустановившийся цикл, состоящий из разгона и следующего за ним торможения с постоянными действующими моментами сил. Реальные циклы с переменными моментами уступают идеализированному циклу по динамичности при одинаковых максимальных механических нагрузках. Поэтому принятое допущение постоянства моментов делает предпочтительным применение идеализированного цикла разгон–торможения для моделирования характеристик гибридной силовой установки на ранней стадии проектирования. Повышение экономических показателей машины возможно путем снижения номинальной мощности двигателя, но это ведет к ухудшению динамических качеств. Поэтому перспективным методом повышения экономичности машин, работающих на неустановившихся режимах, является применение рекуперации энергии торможения без снижения динамических качеств и производительности машины путем выбора оптимальной мощности основного и разгонно-го двигателей.

Под рекуперацией понимается использование накопленной кинетической энергии транспортной гибридной силовой установки и перевод ее в аккумулирующее устройство при торможении, а затем использование ее, например, для питания электродвигателей при разгоне машины. Поставим следующую задачу: улучшить экономические показатели машины без снижения динамических качеств, выбирая оптимальные параметры основного двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и тормозных рекуперлирующих энергию устройств.

Определенные требования часто предъявляются не только к разгону машины, но и ко времени и пути ее торможения, а также к ускорениям и механическим нагрузкам при разгоне. Для удовлетворения

этих требований выполняется динамический расчет, в дополнение к которому при анализе экономичности цикла из суммарного момента, приведенного к выходному валу, выделяются составляющие:

$M_{\Sigma}^{\text{разг}} = M_{\text{дв}} + M_{\text{сопр}} > 0$ — избыточная по сравнению с установившимся значением $M_{\text{сопр}}$ часть движущего момента $M_{\text{дв}}$, идущая на ускорение машины и определяющая ее динамические качества;

$M_{\text{сопр}} = M_{\text{сопр}}^{\text{уст}}$ — часть движущего момента, расходуемая на преодоление момента сопротивления движению. При расчете принимают допущение квазистационарности — затраченную на сопротивление движению работу в процессе разгона можно оценить по параметрам установившегося режима;

$M_{\text{полезн.сопр}} = M_{\text{сопр}} - M_{\text{вредн.сопр}}$ — полезная составляющая момента сил сопротивления, определяющая экономические качества машины.

Проведем энергетический анализ комбинированного режима, состоящего из разгона, установившегося движения и останова машины (рис. 1), для чего рассмотрим зависимости мощностей:

$W_{\Sigma\text{разг}} = W_{\Sigma\text{дв}} - W_{\Sigma\text{сопр}} = M_{\Sigma\text{разг}}\omega(t)$ — суммарная избыточная мощность всех двигателей гибридной силовой установки в процессе разгона;

$W_{\Sigma\text{дв}}^{\text{уст}} = W_{\text{ДВС}} + W_{\text{ЭДВ}}$ — суммарная мощность ДВС и электродвигателей (ЭДВ) при установившемся движении;

$W_{\Sigma\text{торм}} = W_{\Sigma\text{сопр}} + W_{\text{рек}}$ — суммарная мощность сил полезного и вредного сопротивления движению в процессе торможения;

$W_{\text{рек}}$ — реализуемая в процессе торможения мощность рекуперирующих устройств.

Площади между кривыми мощностей и осью абсцисс — осью времени t (см. рис. 1) — это работа двигателей.

При допущении постоянства моментов сил в процессе разгона мощности ДВС ($W_{\text{ДВС}}$) и ЭДВ ($W_{\text{ЭДВ}}$) растут пропорционально времени вместе со скоростью движения $\omega(t)$. Кинетическая энергия машины увеличивается за счет реализации избыточной мощности двигателей (ДВС и разгонных электродвигателей), работающих в процессе разгона параллельно. После набора скорости и достижения скоростью номинального значения $\omega_{\text{ном}}$ происходит снижение мощности или полное отключение разгонных ЭДВ и при установившемся движении $\omega = \text{const}$. В соответствии с принятыми допущениями суммарная мощность двигателей имеет постоянное значение:

$$W_{\Sigma\text{дв}}^{\text{уст}} = W_{\text{ДВС}}(1 + k_{\text{уст}}),$$

где $k_{\text{уст}} = (W_{\text{ЭДВ}}/W_{\text{ДВС}})_{\text{уст}} = v_{\text{ДВС}}/v_{\text{ЭДВ}}$ — принятое постоянное отношение мощностей ЭДВ и ДВС при установившемся движении; $v_{\text{ЭДВ}} = W_{\text{ЭДВ}}/W_{\text{общ}}$, $v_{\text{ДВС}} = W_{\text{ДВС}}/W_{\text{общ}}$ — доли мощностей ЭДВ и ДВС в общей мощности ($W_{\Sigma\text{дв}} = W_{\text{ДВС}} + W_{\text{ЭДВ}}$), позволяющие при моделировании выбирать их оптимальное соотношение. Возможны разные

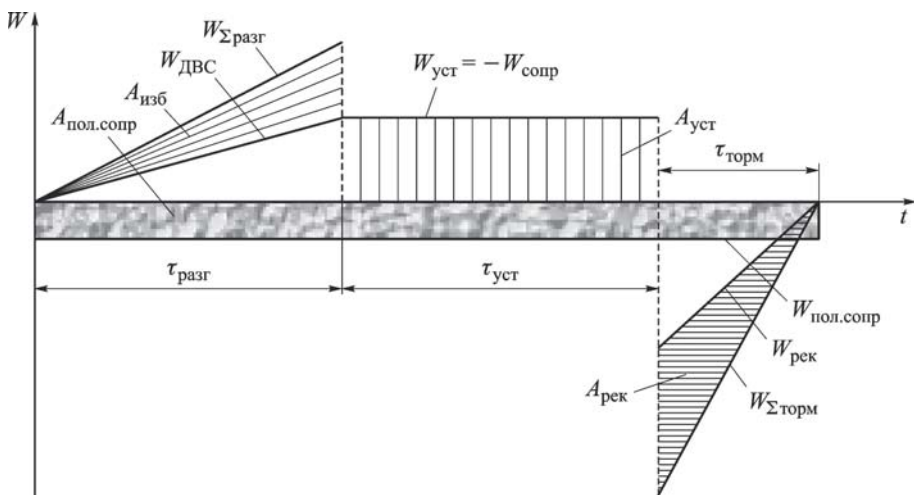


Рис. 1. Обобщенные зависимости мощностей ДВС, разгонных ЭДВ и тормозных рекуперировующих устройств в комбинированном неустановившемся цикле движения гибридной силовой установки

варианты использования мощности разных двигателей, работающих на установившемся режиме параллельно, в зависимости от экономических и экологических требований путем варьирования коэффициента $k_{уст}$.

При торможении все двигатели выключаются и накопленная кинетическая энергия расходуется на преодоление мощности сил сопротивления движению $W_{сопр}$ и мощности рекуперировующих устройств $W_{рек}$, идущей на выработку электрической энергии, запасаемой аккумулялирующим устройством.

Выражение для энергетического баланса работ в комбинированном идеализированном цикле движения можно записать в виде двух уравнений, соответствующих закону сохранения энергии в цикле разгон–торможение и на установившемся режиме:

$$(W_{ЭДВ} + W_{ДВС} - W_{сопр})\tau_{разг}/2 = (W_{сопр} - W_{рек})\tau_{торм}/2;$$

$$W_{ДВС}(1 + k_{уст})\tau_{уст} = W_{сопр}\tau_{уст}.$$

После преобразований получаем уравнения работ в безразмерном виде, что удобно при выборе оптимальных параметров машины в комбинированном цикле движения по критериям быстродействия и экономичности расхода энергии:

$$W_{ДВС}(1 + W_{ЭДВ}/W_{ДВС} - W_{сопр}/W_{ДВС}) = W_{сопр}(1 - W_{рек}/W_{сопр})\tau_{торм}/\tau_{разг};$$

$$W_{ДВС}/W_{сопр} = 1/(1 + k_{уст}),$$

где $W_{ДВС}/W_{сопр} = k_W$ — отношение мощностей ДВС и сил сопротивления движению на установившемся режиме, ранее обозначаемое как коэффициент загрузки ДВС.

Экономичность расхода энергии машины на установившемся режиме при параллельной работе двигателей зависит от КПД и коэффициентов распределения мощности $v_{\text{ДВС}}$, $v_{\text{ЭДВ}}$ между двигателями:

$$\eta_{\text{уст}} = (v_{\text{ДВС}}\eta_{\text{ДВС}} + v_{\text{ЭДВ}}\eta_{\text{ЭДВ}})\eta_{\text{мех}},$$

где $\eta_{\text{ЭДВ}}$, $\eta_{\text{ДВС}}$ — КПД ЭДВ и ДВС, работающих на установившемся режиме параллельно, включая механический КПД передач $\eta_{\text{мех}}$.

Мощность между ДВС и ЭДВ на установившемся режиме распределяется соответственно коэффициентам распределения

$$v_{\text{ДВС}} + v_{\text{ЭДВ}} = 1,$$

и выбираются из соотношения КПД двигателей, работающих параллельно, а также исходя из целесообразности дозаправки машины топливом ДВС и электроэнергией.

В комбинированном режиме необходимо учитывать как цикловой КПД $\eta_{\text{разг.-торм}}^{\text{цикл}}$, характеризующий потери энергии при торможении, так и время работы на неустановившемся режиме:

$$\eta_{\text{общ}} = (v_{\text{уст}}\eta_{\text{уст}} + v_{\text{разг.-торм}}^{\text{цикл}}\eta_{\text{разг.-торм}}^{\text{цикл}})\eta_{\text{мех}},$$

где $v_{\text{уст}} = \tau_{\text{уст}}/\tau_{\text{общ}}$, $v_{\text{разг.-торм}}^{\text{цикл}} = (\tau_{\text{разг}} + \tau_{\text{торм}})/\tau_{\text{общ}}$ — доли продолжительности работы на установившемся и неустановившемся режимах в общем времени движения $\tau_{\text{общ}} = \tau_{\text{разг}} + \tau_{\text{торм}} + \tau_{\text{уст}}$.

В качестве примера рассмотрим расчет оптимального соотношения мощностей ДВС и ЭДВ в цикле разгон-торможение без работы на установившемся режиме. Принимаем, что при торможении ДВС отключен и его работа равна нулю. Поэтому модуль работы сил сопротивления за время торможения равен начальному запасу кинетической энергии при разгоне. Часть накопленной кинетической энергии машины при торможении может быть рекуперирована, т.е. превращена электромашинной в электрическую энергию, аккумулирована и возвращена обратно в виде положительной работы разгонного ЭДВ в следующий цикл разгона.

Кинетическая энергия в конце разгона $T_{\text{разг}}$ имеет максимальное значение в цикле разгон-торможение и равна запасу кинетической энергии в начале торможения:

$$T_{\text{разг}} = T_{\text{мах}} = J_{\Sigma}^{\text{пр}}\omega_{\text{кон}}^2/2 = m v_{\text{кон}}^2/2,$$

где $\omega_{\text{кон}} = \omega_{\text{ном}}$, $v_{\text{кон}}$ — значения номинальной скорости вращения звена приведения и скорости машины в конце разгона; m — масса машины; J_{Σ} — суммарный приведенный момент инерции машины.

Работа, затрачиваемая на ускорение машины, связана с избыточной мощностью двигателей $W_{\text{изб}}$, которая наряду со временем разгона $\tau_{\text{разг}}$

определяет запас кинетической энергии в конце разгона:

$$T_{\text{разг}} = A_{\Sigma}^{\text{разг}} = \int W_{\text{изб}} dt,$$

где $W_{\text{изб}} = M_{\Sigma \text{разг}} \omega(t)$ — избыточная по сравнению с необходимой для движения с постоянной скоростью мощность двигателей машины (принимается одинаковой для цикла с рекуперацией и без рекуперации энергии и поэтому обеспечиваются одинаковые динамические качества машины); $\omega(t)$ — угловая скорость выходного вала, определяющая текущую скорость машины.

В целях упрощения аналитических выводов было введено понятие идеализированного цикла разгон-торможение, для чего было принято допущение о постоянных значениях моментов $M_{\text{дв}}$, $M_{\text{сопр}}$ и момента инерции. При этих условиях режим разгона является равномерно ускоренным с постоянным угловым ускорением

$$\varepsilon_{\text{разг}} = \frac{M_{\Sigma}^{\text{разг}}}{J_{\Sigma}}.$$

Время разгона при равномерно ускоренном движении можно оценить как

$$\tau_{\text{разг}} = \omega_{\text{кон}} / \varepsilon_{\text{разг}}.$$

Оставляя прежние допущения и принимая суммарный момент при торможении в виде двух составляющих

$$M_{\Sigma}^{\text{торм}} = M_{\text{торм}} + M_{\text{сопр}},$$

где $M_{\text{торм}}$ — тормозной момент и $M_{\text{сопр}}$ — момент сил сопротивления движению, можно провести аналогичные расчеты при торможении машины:

$$\tau_{\text{торм}} = \frac{\omega_{\text{кон}} J_{\Sigma}}{M_{\Sigma}^{\text{торм}}}, \quad \varphi_{\text{торм}} = \frac{T_{\text{разг}}}{M_{\Sigma}^{\text{торм}}}.$$

Часть накопленной кинетической энергии машины при торможении может быть рекуперирована, т.е. превращена обратимой электромашиной в электрическую энергию, аккумулирована и возвращена обратно в виде положительной работы разгонного ЭДВ в следующем цикле разгона:

$$T_{\text{акк}} = k_{\text{акк}} \eta_{\text{акк}} T_{\text{разг}},$$

где $k_{\text{акк}} = \frac{(A_{\text{рекуп}})_{\text{цикл}}}{T_{\text{разг}}}$ — коэффициент рекуперации, показывающий, какая часть кинетической энергии машины возвращается в последующем цикле разгона с потерями, которые оцениваются с помощью КПД трансформации энергии $\eta_{\text{трансф}}$.

Цикловой КПД $\eta_{\text{разг-торм}}^{\text{цикл}}$ позволяет оценить экономичность расхода энергии гибридной силовой установки суммарно за общее время дви-

жения комбинированного цикла (см. рис. 1), учитывая дополнительные потери кинетической энергии при торможении. В дальнейшем будем сравнивать КПД различных циклов разгон-торможение с разными параметрами машины, в результате могут быть снижены расход энергии при торможении и номинальная мощность ДВС. Рассматривая экономичность такого неустановившегося цикла, целесообразно сравнить его с более экономичным установившимся режимом движения между циклами разгон-торможение. Поэтому имеет смысл сравнивать КПД неустановившегося цикла разгон-торможение с КПД работы машины на установившемся режиме $\eta_{уст}$.

Полезная работа в цикле разгон-торможение равна

$$(A_{\text{полезн}})_{\text{цикл}} = M_{\text{сопр}} (\varphi_{\text{разг}} + \varphi_{\text{торм}}) \eta_{уст}.$$

Процесс торможения не требует работы двигателя, поэтому общая затраченная работа в цикле равна работе двигателей в период разгона

$$(A_{\text{дв}})_{\text{цикл}} = M_{\Sigma\text{дв}} \varphi_{\text{разг}}.$$

В идеализированном цикле без рекуперации КПД машины записывается как

$$\eta_{\text{цикл}}^{\text{без рекуп}} = \frac{\eta_{уст}}{k_{\text{изб}}} \left(1 + \frac{\varphi_{\text{торм}}}{\varphi_{\text{разг}}} \right),$$

где $k_{\text{изб}} = \frac{M_{\Sigma}^{\text{разг}}}{M_{\text{сопр}}} = 1 + 1/k_W$ — отношение суммарного момента в процессе разгона к моменту сопротивления на установившемся режиме движения; $k_W = M_{\text{сопр}}/M_{\text{дв ном}}$ — коэффициент использования номинальной мощности двигателя.

Аккумулированная энергия, возвращенная в цикл при разгоне $(A_{\text{рекуп}})_{\text{цикл}}$, может быть признана полезной, так как повышает КПД цикла разгон-торможение на $\Delta\eta_{\text{рек}}$ и уменьшает расход топлива ДВС:

$$\eta_{\text{цикл}}^{\text{с рекуп}} = \eta_{\text{цикл}}^{\text{без рекуп}} + \Delta\eta_{\text{рекуп}},$$

где $\Delta\eta_{\text{рекуп}} = \frac{A_{\text{рекуп}}}{(A_{\text{загр}})_{\text{цикл}}}$ — увеличение КПД цикла вследствие рекуперации энергии.

Для энергии, аккумулируемой при торможении ($T_{\text{акк}}$), должен быть рассчитан накопитель энергии. Необходимую номинальную мощность $W_{\text{акк}} = W_{\text{Эдв}}$ трансформирующих энергию устройств (электродвигателей, генераторов и аккумуляторов) можно определить по аккумулируемой энергии и соответствующему времени разгона или торможения:

$$W_{\text{акк}} = \frac{T_{\text{акк}}}{\tau_{\text{разг}}} = \frac{k_{\text{акк}} T_{\text{разг}} \eta_{\text{трансф}}}{\tau_{\text{разг}}}.$$

Оставляя при расчетах суммарную мощность двигателей неизменной, выявили, что без ущерба для динамических качеств машины зна-

чение мощности аккумулирующих устройств $W_{\text{акк}}$ может быть снижена номинальная мощность ДВС при уменьшении расхода топлива ДВС до 13 %:

$$W_{\text{ДВС}}^{\text{ном}} = W_{\Sigma\text{дв}}^{\text{ном}} - W_{\text{акк}},$$

где $W_{\Sigma\text{дв}}^{\text{ном}} = M_{\Sigma\text{дв}}^{\text{разг}} \omega_{\text{ном}}$ – суммарная номинальная мощность всех двигателей, используемая во время разгона машины; $M_{\Sigma\text{дв}} = M_{\text{ДВС}} + M_{\text{ЭДВ}}$ – суммарный момент ДВС и разгонного ЭДВ, который выбирают, исходя из требуемых динамических качеств машины, определяемых временем разгона $\tau_{\text{разг}}$ до номинальной скорости $\omega_{\text{кон}} = \omega_{\text{ном}}$ машины:

$$M_{\Sigma\text{дв}} = \frac{\omega_{\text{кон}} J_{\Sigma}}{\tau_{\text{разг}}} + M_{\text{сопр}}.$$

Таким образом, снижение номинальной мощности ДВС при той же мощности сил сопротивления движению $W_{\text{сопр}}$ позволяет увеличить коэффициент загрузки ДВС k_W на установившемся режиме работы и снизить удельный расход топлива ДВС:

$$\Delta g_e = \frac{g_e^{\text{ном}} W_{\text{ЭДВ}}}{W_{\text{ДВС}}},$$

где $g_e^{\text{ном}}$ – удельный расход топлива ДВС на номинальном режиме; $W_{\text{ЭДВ}}$ – мощность разгонного ЭДВ.

По приведенной ранее математической модели были выполнены моделирование и расчеты КПД в цикле движения разгон-торможение гибридной силовой установки, оснащенной ДВС и обратимыми ЭДВ, с параметрами: $m = 800$ кг, $v_{\text{кон}} = 80$ км/ч, $W_{\text{ДВС}}^{\text{ном}} = 60$ кВт. При моделировании КПД обеспечивается сравнение циклов разгон-торможение, одинаковых по динамичности с рекуперацией энергии и без нее, при варьировании коэффициента $k_{\text{торм}} = \frac{M_{\text{торм}}}{M_{\text{ДВС}}}$, представляющего собой отношение мощностей электрических тормозных устройств и ДВС. Выбирать $k_{\text{торм}}$ в качестве варьируемого параметра при моделировании необязательно, в качестве оптимизируемого параметра можно выбрать и другие показатели гибридной силовой установки. Путем моделирования на ЭВМ была выявлена зависимость КПД неустановившегося цикла разгон-торможение (рис. 2) от выбранного режима торможения, определяемого вариацией коэффициента $k_{\text{торм}}$, при принятом постоянном значении КПД установившегося движения $\eta_{\text{уст}}$.

Выводы. 1. Коэффициент полезного действия цикла разгон-торможение без рекуперации энергии и при отсутствии установившегося движения повышается при снижении тормозного момента ($k_{\text{торм}} < 0,5$) и увеличении вследствие этого времени торможения путем использования накопленной кинетической энергии для преодо-

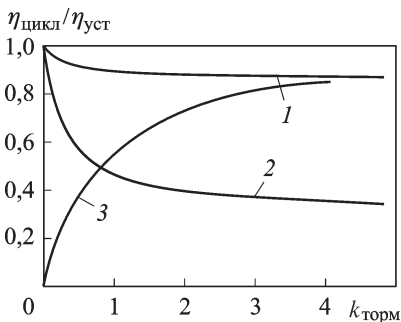


Рис. 2. КПД цикла разгон-торможение:

1 — с рекуперацией энергии $\eta_{\text{цикл}}^{\text{с рек.}}$; 2 — без рекуперации энергии $\eta_{\text{цикл}}^{\text{без рек.}}$; 3 — $k_{\text{рек}}$

ления полезного сопротивления. Цикловой КПД становится максимальным при $k_{\text{торм}} = 0$:

$$\eta_{\text{цикл}}^{\text{с рекуп}} = \eta_{\text{цикл}}^{\text{без рекуп}}.$$

2. Без рекуперации энергии КПД цикла становится низким и постоянным при резком торможении ($k_{\text{торм}} \geq 0,5$).

3. Путем рекуперации энергии при торможении можно добиться значительного повышения циклового КПД (кривая 1 расположена выше, чем кривая 2, см. рис. 2), причем можно поддерживать высокое значение КПД в широком диапазоне времени торможения, т.е. вне зависимости от значения тормозного момента, определяемого при моделировании коэффициентом $k_{\text{торм}}$.

4. Применение рекуперации энергии повышает экономичность гибридной силовой установки с ДВС, не ухудшая ее динамические качества и не снижая ее производительность.

5. Моделирование выявило возможность снизить на 30 % расчетную номинальную мощность ДВС в силу соответствующего увеличения мощности разгонных ЭДВ и вследствие этого снизить расчетный удельный расход топлива ДВС на установившемся режиме движения на 13 %.

Статья поступила в редакцию 5.11.2009

Н.Н. Барбашов — аспирант кафедры “Теория машин и механизмов” МГТУ им. Н.Э. Баумана.

N.N. Barbashov — Post-graduate of “Theory of Machines and Mechanisms” department of the Bauman Moscow State Technical University.

И.В. Леонов — д-р техн. наук, профессор кафедры “Теория машин и механизмов” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 научных работ и изобретений, отмеченных серебряной медалью Европейского салона “Архимед-2004”.

Leonov I.V. — D. Sc. (Eng.), professor, head of “Theory of Machines and Mechanisms” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 200 publications and inventions marked by the silver medal of the European saloon “Archimed-2004”.