

УДК 621.43.(075): 629.113

Д. И. Леонов, И. В. Леонов

## МЕТОДЫ УЛУЧШЕНИЯ ЭКОНОМИЧНОСТИ МАШИН С ДВИГАТЕЛЯМИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ

*Оценена экономичность расхода энергии при проектировании машин на базе расчета циклового КПД на установившихся и переходных режимах. За основу взят неустановившийся цикл работы машины с переключением разгона на торможение. На основе анализа энергетического баланса машины выведено общее уравнение циклового КПД машины. Предложена универсальная методика выбора мощности двигателей, момента переключения и других параметров машинного агрегата.*

Развитие машиностроения происходит в острой конкурентной борьбе, основными приемами которой являются повышение производительности машин, снижение издержек производства и расхода энергии при эксплуатации [1]. Правительством РФ приняты “Основные положения энергетической стратегии РФ на период до 2020 года”. В соответствии с этой программой поставлены следующие задачи: снижение расхода энергии в промышленности и коммунальном хозяйстве; конструирование высокоэффективного энергосберегающего отечественного оборудования.

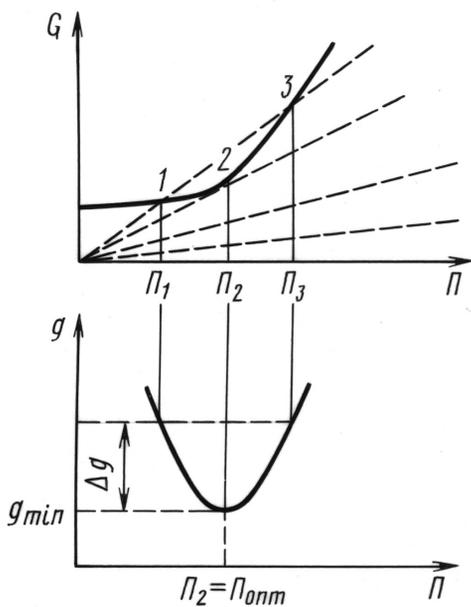
Снижение расхода энергии при эксплуатации машин является одним из наиболее важных вопросов, решаемых при их проектировании. Экономичность расхода энергии часто характеризуется в удельных единицах:

$$g = \frac{G}{\Pi},$$

где  $\Pi$  — производительность машины (выработка продукции в единицу времени);  $G$  — абсолютный расход энергии в единицу времени. Например, экономичность двигателя внутреннего сгорания (ДВС) оценивается удельным расходом топлива, который показывает, какое количество топлива расходуется двигателем на единицу эффективной мощности в течение часа [2]

$$g_e = G/W_e,$$

где  $G$  — часовой расход топлива;  $W_e$  — эффективная мощность на валу ДВС.



**Рис. 1.** Графики зависимости абсолютно-го ( $G$ ) и удельного ( $g$ ) расходов энергии от производительности машины  $\Pi$

Изменение характера графика зависимости  $g = f(\Pi)$  объясняется тем, что увеличение удельного расхода энергии на единицу выработанной продукции перемещает его относительно графика левее или правее оптимальной производительности  $\Pi_{\text{опт}}$ , что свидетельствует о непропорциональном увеличении удельных потерь энергии. Кстати, при нулевой производительности удельный расход энергии бесконечно велик у машин любого типа, что делает эту оценку неудобной для инженерных расчетов. Для того чтобы лучше представить физическую связь между удельным и абсолютным расходами энергии представим производную удельного расхода энергии как дробь  $g' = (G/\Pi)'$ :

$$\frac{\partial g(\Pi)}{\partial \Pi} = \left( \Pi \frac{\partial G}{\partial \Pi} - G \right) / \Pi^2.$$

Оптимальный режим  $\Pi_{\text{опт}}$  по критерию минимального удельного расхода энергии можно найти из условия равенства нулю первой производной  $g'(\Pi) = 0$ :

$$\Pi_{\text{опт}} \frac{\partial G}{\partial \Pi} (\Pi_{\text{опт}}) - G(\Pi_{\text{опт}}) = 0 \quad \text{или} \quad \frac{\partial G}{\partial \Pi} (\Pi_{\text{опт}}) = \frac{G}{\Pi_{\text{опт}}} = g_{\text{min}},$$

где  $g_{\text{min}}$  — минимальный удельный расход энергии.

Таким образом, на оптимальном по удельному расходу энергии режиме, который характеризуется оптимальной производительностью  $\Pi_{\text{опт}}$ , значения производной функции абсолютного расхода энергии

Абсолютный расход энергии  $G$  зависит от многих факторов, но в условиях эксплуатации связан с производительностью  $\Pi$  машины. Зависимость абсолютного расхода энергии  $G = f(\Pi)$  в общем виде представлена на рис. 1. Следует отметить, что даже при нулевой производительности (так называемый холостой ход  $\Pi = 0$ ) существует расход энергии  $G_{\text{хх}}$  на движение и на поддержание параметров машины на некотором уровне, чтобы в дальнейшем машина могла принять нагрузку. График зависимости удельного расхода энергии  $g = f(\Pi)$  получается в результате перестроения графика зависимости абсо-

$\frac{\partial G}{\partial \Pi}(\Pi_{\text{опт}})$  равно минимальному удельному расходу энергии  $g_{\min}$ . Этот факт имеет следующий геометрический (физический) смысл:  $g_{\min}$  графически представляет собой касательную к графику функции абсолютного расхода энергии  $G = f(\Pi)$ , проведенную из начала координат. На рис. 1 нанесено семейство расчетных линейных зависимостей  $G = f(\Pi)$  при постоянной экономичности, т.е. при постоянном удельном расходе энергии  $g = \text{const}$ , при котором зависимость абсолютного расхода энергии  $G$  от производительности  $\Pi$  является линейной, т.е.  $G = g\Pi$ , и представляет собой прямую, проходящую через начало координат с коэффициентом пропорциональности, равным удельному расходу энергии  $g$ . Рассмотрим верхнюю прямую, соответствующую более высокому удельному расходу энергии  $g \geq g_{\min}$ , которая соответствует возрастанию удельного расхода энергии  $\Delta g = g - g_{\min}$  по отношению к минимальному  $g_{\min}$ . Пересечение верхней прямой  $g > g_{\min}$  с реальной характеристикой  $G = f(\Pi)$  в двух точках (1 и 3) свидетельствует о том, что между ними находится область с меньшим удельным расходом энергии  $g_1 = g_3 > g_{\min}$ .

Однако потребителя часто интересует минимизация абсолютного расхода энергии  $G$ . Оценим возможность абсолютного перерасхода энергии по сравнению с минимально возможным. Представим такую оценку  $\Delta G$  в виде разности абсолютного расхода энергии при реальном удельном расходе  $G(\Pi, g)$  и возможного при минимальном удельном расходе  $G(g_{\min})$ :

$$\Delta G(\Pi) = g\Pi - g_{\min}\Pi.$$

Назовем эту оценку ростом абсолютного расхода энергии при возрастании удельного расхода и той же производительности

$$\Delta G(\Pi) = \Delta g\Pi,$$

где  $\Delta g = (g - g_{\min})$  — рост удельного расхода энергии по сравнению с минимальным  $g_{\min}$ .

Чем сильнее отклоняется график режима работы от графика оптимальной производительности  $\Pi_{\text{опт}}$ , тем больше будут абсолютные перерасходы энергии (т.е. абсолютные потери) по сравнению с минимально возможными расходами энергии в условиях работы с минимальными удельными расходами энергии  $g_{\min}$  при оптимальной производительности. Такими характеристиками обладают ДВС, а также насосы и компрессоры с управлением давлением перепуском рабочего тела на впуск [2, 3].

Если аппроксимировать зависимость абсолютного расхода квадратичной сплайн-функцией

$$G(\Pi) = C_0 + C_1\Pi + C_2\Pi^2,$$

то выражение удельного расхода энергии примет вид

$$g = C_0/\Pi + C_1 + C_2\Pi,$$

где  $C_0, C_1, C_2$  — постоянные степенного ряда, определяемые из характеристики расхода энергии  $G(\Pi)$ . Например, при  $\Pi = 0$  величина  $G = G_{xx}C_0 = G_{xx}$  — абсолютный расход энергии на холостом ходу, при  $\Pi = \Pi_{\text{опт}}$  имеем  $G(\Pi_{\text{опт}}) = g_{\text{min}}\Pi_{\text{опт}}, g = g_{\text{min}}C_1 = g_{\text{min}}$ , откуда

$$C_2 = -G_{xx}/(\Pi_{\text{опт}})^2.$$

Приведенное аппроксимирующее выражение  $g(\Pi)$  включает в себя барьерную функцию  $C_0/\Pi$  и отвечает начальным условиям при  $\Pi = 0$   $g \rightarrow \infty$  [4]. Аппроксимированные показатели увеличения удельного и абсолютного расходов энергии примут вид

$$\Delta g = g - g_{\text{min}} = G_{xx}/\Pi - (G_{xx}/\Pi_{\text{опт}}^2)/\Pi;$$

$$\Delta G(\Pi) = \Delta g\Pi = G_{xx}[1 - (\Pi/\Pi_{\text{опт}})^2].$$

Последняя зависимость показывает, что значение функции абсолютного перерасхода энергии  $\Delta G(\Pi)$  будет расти при отклонении от оптимального по экономичности режима. В качестве примера рассмотрим аппроксимированную характеристику удельного расхода топлива дизель-электрического автосамосвала БелАЗ-549:

$$g = C/\Pi = g_{\text{min}}\Pi_{\text{опт}}/\Pi,$$

где  $C = G(\Pi_{\text{опт}}) = g_{\text{min}}\Pi_{\text{опт}}$  — параметр экономичности машины, характеризующий расход энергии на оптимальном режиме работы машины. При гиперболической характеристике  $g(\Pi)$  возрастания удельного расхода энергии по сравнению с минимальным расходом энергии  $g_{\text{min}}$  при отклонении от оптимальной производительности  $\Pi_{\text{опт}}$  машины удельный перерасход энергии будет

$$\Delta g = g - g_{\text{min}} = g_{\text{min}}[\Pi_{\text{опт}}/\Pi - 1] = g_{\text{min}}[1/k_{\text{п}} - 1],$$

где  $k_{\text{п}} = \Pi/\Pi_{\text{опт}}$  — коэффициент загрузки, равный отношению текущей производительности к производительности на оптимальном режиме.

Применяя подобную оценку к дизель-электрическому автосамосвалу БелАЗ-549, рассчитаем по идеализированной гиперболической зависимости рост удельного расхода энергии  $\Delta g$  в процентах от  $g_{\text{min}}$  в зависимости от степени загрузки  $k_{\text{п}}$  (результаты приведены в таблице).

Таблица

**Увеличение расхода энергии в зависимости от степени загрузки ДВС**

| $k_{\text{п}}$            | 0                    | 10 %  | 25 %  | 50 %  | 75 % | 100 % |
|---------------------------|----------------------|-------|-------|-------|------|-------|
| $\Delta g/g_{\text{min}}$ | $\rightarrow \infty$ | 900 % | 300 % | 100 % | 30 % | 0 %   |

Анализируя таблицу, отметим, что при снижении степени загрузки машины до 50 % происходит увеличение удельного расхода энергии на

100 % (т.е. в 2 раза). Даже использование машины с 75 %-ной загрузкой от оптимальной производительности вызывает увеличение удельного расхода энергии на 30 % по сравнению с минимально возможным расходом. При снижении степени загрузки машины до 10 % происходит увеличение удельного расхода энергии в 9 раз. Таким образом, увеличение абсолютного расхода энергии  $\Delta G$  зависит от важной энергетической характеристики машины, от расхода энергии на оптимальном режиме работы машины

$$C = G(\Pi_{\text{опт}}) = g_{\text{min}}\Pi_{\text{опт}}$$

и отклонения производительности машины от оптимальной.

Повышение экономичности машин связано с возможностью смещения режима работы двигателя по статической характеристике относительно расчетного номинального режима работы. Тепловые двигатели проектируются таким образом, что режим работы, указываемый как номинальный, располагается вблизи наиболее экономичного режима. Номинальную мощность установленного в машине двигателя, как правило, выбирают, исходя из необходимости сокращения времени разгона или кратковременного приема пиковой нагрузки. Поэтому номинальная установленная мощность двигателя оказывается заведомо большей, чем это необходимо для работы в установившемся режиме работы, что часто приводит к снижению его экономичности на режимах частичной мощности. Значительный неиспользуемый на установившемся режиме запас мощности двигателя по сравнению с его номинальным режимом работы приводит к увеличению потерь и перерасходу энергии из-за работы в неэкономичном режиме. Повышение экономичности расхода энергии на установившихся режимах возможно благодаря снижению номинальной установленной мощности двигателя и повышению коэффициента его загрузки  $k_n$  (т.е. степени использования номинальной мощности).

В условиях эксплуатации машины редко работают в установившемся режиме. Значительную часть времени современные машины работают с частым изменением скоростного и нагрузочного режимов, с чередованием разгона и торможения. На этих режимах, как правило, увеличивается расход энергии. Поскольку неустановившийся цикл движения машины заканчивается ее остановкой, то часто предъявляются определенные требования не только к разгону машины, но и ко времени и пути останова машины, а также к ускорениям и нагрузкам, с которыми он осуществляется. Для удовлетворения этих требований конструктору приходится проводить динамический расчет, который основывается на энергетических соотношениях процессов,

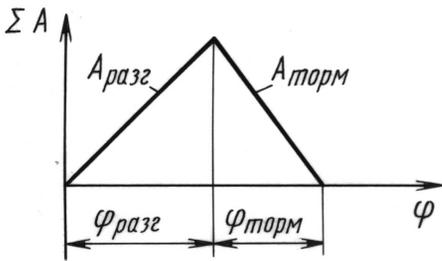
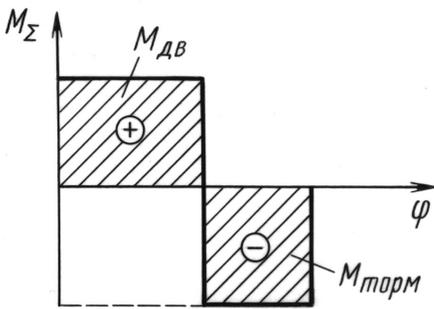


Рис. 2. Идеализированный цикл движения машинного агрегата “разгон-торможение”

сил полезного и вредного сопротивления;  $M_{\text{торм}}$  — момент торможения;  $M_{\text{дв}}$  — момент двигателя.

Поскольку при останове машины скорость  $\omega$  и кинетическая энергия  $T$  в конце цикла равны нулю, то величина  $\Delta T$  будет равна запасу кинетической энергии в конце разгона:

$$\Delta T = T_{\text{max}} = \mathfrak{S}_{\Sigma} \omega_{\text{max}}^2,$$

где  $\omega_{\text{max}}$  — значение скорости в момент переключения машины с разгона на торможение.

Суммарная работа при останове будет отрицательной, равной работе всех сил (моментов), включая полезное и вредное сопротивление:

$$\sum A_{\text{торм}} = \int_0^{\varphi_{\text{торм}}} M_{\Sigma_{\text{торм}}} d\varphi.$$

Модули работ при разгоне  $A_{\text{разг}}$  и останове  $A_{\text{торм}}$  должны быть равны между собой:

$$A_{\text{разг}} = \int_0^{\varphi_{\text{разг}}} M_{\Sigma_{\text{дв}}} d\varphi = A_{\text{торм}} = \left| \int_0^{\varphi_{\text{торм}}} M_{\Sigma_{\text{торм}}} d\varphi \right|.$$

С учетом принятых допущений, что разгон и торможение осуществляются при постоянных значениях приведенных моментов сил и

протекающих в машинах. Рассмотрим подробнее идеализированный неустановившийся режим, состоящий из циклов разгона и следующего за ним торможения машины (рис. 2). Идеализация цикла заключается в допущении постоянства действующих моментов сил и суммарного приведенного момента инерции  $\mathfrak{S}_{\Sigma}$  [5]:

$$M_{\Sigma_{\text{разг}}} = M_{\text{дв}} + M_{\text{вр.сопр}} + M_{\text{пол.сопр}} \quad (\text{при разгоне});$$

$$M_{\Sigma_{\text{торм}}} = M_{\text{торм}} + M_{\text{вр.сопр}} + M_{\text{пол.сопр}} \quad (\text{при торможении}),$$

где  $M_{\Sigma_{\text{разг}}}$  и  $M_{\Sigma_{\text{торм}}}$  — суммарные приведенные моменты сил при разгоне и торможении;  $M_{\text{пол.сопр}}$  и  $M_{\text{вр.сопр}}$  — приведенные моменты

моментов инерции, можно найти связь между движущим моментом при разгоне и моментом торможения при останове, а также угловую координату  $\varphi_{\text{пер}} = \varphi_{\text{разг}}$  (или момент времени) переключения с разгона на торможение

$$M_{\Sigma\text{дв}}\varphi_{\text{разг}} = M_{\Sigma\text{торм}}\varphi_{\text{торм}},$$

где  $\varphi_{\text{разг}}$ ,  $\varphi_{\text{торм}}$  — пути, проходимые звеном приведения при разгоне и останове.

При рассмотренных допущениях движение в цикле “разгон–торможение” является равноускоренным и равнозамедленным с постоянным ускорением:

$$\varepsilon_{\text{разг}} = M_{\Sigma\text{дв}}/\mathfrak{S}_{\Sigma}, \quad \varepsilon_{\text{торм}} = M_{\Sigma\text{торм}}/\mathfrak{S}_{\Sigma}.$$

Максимальная скорость  $\omega_{\text{max}}$  в цикле может быть найдена из условия равенства максимального значения кинетической энергии и работы движущих сил, например, по уравнению движения в энергетической форме:

$$T_{\text{max}} = \mathfrak{S}_{\Sigma}\omega_{\text{max}}^2/2 = A_{\text{дв.цикл}} = M_{\Sigma\text{разг}}\varphi_{\text{разг}},$$

где  $\omega_{\text{max}} = \sqrt{2A_{\text{дв.цикл}}/\mathfrak{S}_{\Sigma\text{пр}}}$  — максимальная скорость в цикле.

Время движения в цикле “разгон–торможение”

$$\tau_{\text{цикл}} = \tau_{\text{разг}} + \tau_{\text{торм}},$$

где  $\tau_{\text{разг}} = \omega_{\text{max}}/\varepsilon_{\text{разг}} = \omega_{\text{max}}\mathfrak{S}_{\Sigma}/M_{\Sigma\text{разг}}$  — время разгона;  $\tau_{\text{торм}} = \omega_{\text{max}}\mathfrak{S}_{\Sigma}/M_{\Sigma\text{торм}}$  — время торможения.

Найденные  $\tau_{\text{разг}}$  и  $\tau_{\text{торм}}$  позволяют определить связь максимальной скорости  $\omega_{\text{max}}$  и проходимого в цикле пути при разгоне и торможении

$$\varphi_{\text{цикл}} = \varphi_{\text{разг}} + \varphi_{\text{торм}},$$

где  $\varphi_{\text{разг}} = \mathfrak{S}_{\Sigma}\omega_{\text{max}}^2/2M_{\Sigma\text{разг}}$ ,  $\varphi_{\text{торм}} = \mathfrak{S}_{\Sigma}\omega_{\text{max}}^2/2M_{\Sigma\text{торм}}$ .

У реальных транспортных машин мощность двигателя намного меньше мощности тормозных устройств, поэтому динамика цикла “разгон–торможение” в значительной степени определяется временем разгона, зависящим от “избыточной мощности” двигателя  $M_{\Sigma\text{разг}}$  и максимальной скорости  $\omega_{\text{max}}$ ,

$$\tau_{\text{разг}} = \frac{\omega_{\text{max}}}{\varepsilon} = \frac{\omega_{\text{max}}}{M_{\Sigma}} J_{\Sigma}.$$

Время разгона машины при моментах, не зависящих от скорости и координаты, может быть представлено как

$$\tau_{\text{разг}} = \frac{\tau_{\text{min}}}{M_{\Sigma}/M_{\text{дв}}},$$

где  $\tau_{\text{min}} = \frac{\omega_{\text{max}} J_{\Sigma}}{M_{\text{дв}}}$  — минимально возможное время разгона без нагрузки.

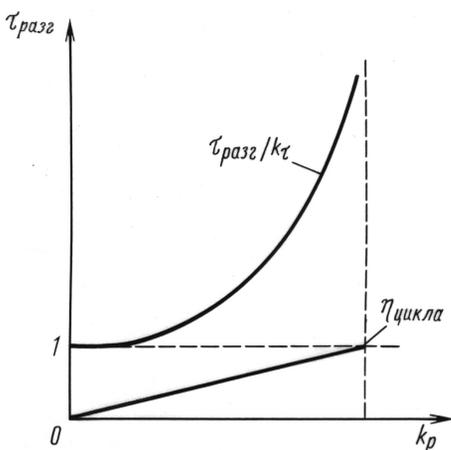


Рис. 3. Зависимость времени разгона и КПД от параметра  $k_p$

$$\frac{\tau_{\text{разг}}}{k_{\tau}} = \frac{1}{\sqrt{k_{\varphi}(1 - k_p)}}$$

где  $\varphi_{\text{разг}}, \varphi_{\text{торм}}$  — угловые пути при разгоне и торможении;  $k_{\tau} = \sqrt{\frac{2\varphi_{\text{торм}}J_{\Sigma}}{M_{\text{дв}}}}$  — постоянная цикла;  $k_{\varphi} = \frac{\varphi_{\text{торм}}}{\varphi_{\text{разг}}}$  — коэффициент, определяющий вид цикла.

Анализ свойств цикла “разгон–торможение” позволяет сделать следующие выводы.

Наиболее высокими динамическими качествами обладает цикл “разгон–торможение” при постоянных моментах сил, в котором “мгновение” переключения определяется условием равенства работы при торможении и накопленной кинетической энергии. Однако накопленная кинетическая энергия при торможении будет потеряна, что существенно увеличивает расход энергии в цикле. Применение

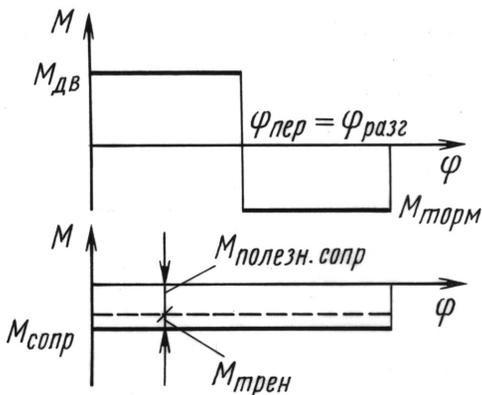


Рис. 4. Структура цикла “разгон–торможение”

Для оценки динамических и экономических показателей цикла “разгон–торможение” при вариации используемой в процессе разгона мощности двигателя представим эти показатели в виде функции коэффициента использования номинальной мощности двигателя  $k_p$ , как это уже делалось при анализе работы на установившихся режимах. Динамические качества машины, которые представлены на рис. 3, оценивались по выражениям, полученным при декомпозиции цикла (рис. 4):

рекуперации энергии при торможении позволяет не только сохранить высокие динамические качества, но и значительно повысить экономичность.

Для оценки расхода энергии проведем декомпозицию идеализированного цикла “разгон–торможение” (см. рис. 1) и выделим из него составляющие моменты двигателя, торможения и полезного сопротивления, как показано на рис. 4.

Экономичность расхода энергии оценивается с помощью циклового КПД  $\eta_{\text{цикл}}$ , представляющего собой отношение полезной работы за цикл “разгон–торможение” к затраченной двигателем работе в процессе разгона:

$$\eta_{\text{цикл}} = A_{\text{пол. сопр}} / A_{\text{дв. цикл}}$$

Работы двигателя  $A_{\text{дв. разг}}$  и полезного сопротивления  $A_{\text{пол. сопр}}$  определяются интегрированием приведенных моментов. При допущении постоянства моментов в цикле выражения работ и циклового КПД указанные параметры принимают вид [6]:

$$A_{\text{полн.сопр}} = \int_0^{\varphi} M_{\text{полн.сопр}} d\varphi = M_{\text{полн.сопр}} \varphi_{\text{цикла}};$$

$$A_{\text{дв}} = \int_0^{\varphi} M_{\text{дв}} d\varphi = M_{\text{дв}} \varphi_{\text{разг}};$$

$$\eta_{\text{цикла}} = k_p (1 + k_\varphi).$$

Моделирование циклового КПД при вариации коэффициента использования мощности двигателя  $k_p$  показывает, что  $\eta_{\text{цикл}}$  линейно зависит от коэффициента  $k_p$  и параметра цикла “разгон–торможение”  $k_\varphi$ , определяющего работу тормозных сил, как показано на рис. 3.

Анализ приведенных на рис. 3 зависимостей экономических и динамических показателей машины от мощности двигателя (полученных вариацией коэффициента  $k_p$ ) показывает, что снижение номинальной мощности двигателя, т.е. увеличение коэффициента его загрузки  $k_p$ , вызывается снижением работы двигателя  $A_{\text{дв. разг}}$  ( $\varphi_{\text{разг}}$ ) и запаса кинетической энергии  $\Delta T$  на участке разгона, что является универсальным приемом повышения КПД цикла “разгон–торможение”. Однако это вызывает увеличение времени разгона и всего цикла движения. Взаимосвязь динамических и экономических показателей при изменении мощности двигателя показана на рис. 5.

При проведении анализа экономических свойств цикла “разгон–торможение” целесообразно выделить из общего момента сопротивления механические потери на трение, оцениваемые обычным механическим КПД. Выделяя полезную и вредную составляющие момента сопротивления:

$$M_{\text{сопр}} = M_{\text{сопр. полезн}} + M_{\text{сопр. трения}},$$

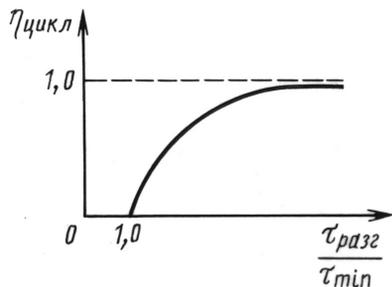


Рис. 5. Взаимосвязь динамических и экономических показателей при  $k_\varphi = \text{const}$  и изменении коэффициента  $k_p$

получим, что общий КПД на неустановившемся режиме будет равен произведению механического КПД  $\eta_{\text{мех}}$  (учитывающего работу сил трения на установившемся режиме) и циклового КПД  $\eta_{\text{цикл}}$  (учитывающего дополнительные потери кинетической энергии на торможение в неустановившемся цикле):

$$\eta_{\text{общ}} = \eta_{\text{цикл}} \eta_{\text{мех}}.$$

В частном случае в режиме выбега машины, т.е. при  $M_{\text{торм}} = 0$ , кинетические потери отсутствуют ( $\eta_{\text{цикл}} = 1$ ), так как они идут на компенсацию работы сил сопротивления, и

$$\eta_{\text{общ}} = \eta_{\text{мех}}.$$

Анализ зависимостей динамических и экономических качеств, представленных на рис. 3 и 5, не дает однозначного ответа на вопрос, какое значение коэффициента загрузки  $k_p$  является оптимальным. Минимизация времени разгона требует  $k_p = 0$ , при этом и КПД цикла  $\eta_{\text{цикл}} = 0$ . Минимизация критерия расхода энергии, обратного цикловому КПД  $1/\eta_{\text{цикл}}$  требует  $k_p = 1$ , при котором время разгона стремится к бесконечности. Таким образом, рекомендации для выбора мощности двигателя по этим критериям являются противоположными. Для решения задачи оптимального выбора  $k_p$  и, тем самым, выбора оптимальной мощности двигателя (при известной мощности сил сопротивления) сформируем обобщенный критерий в виде:

$$I_0 = c_\tau (\tau_{\text{разг}} / \tau_{\text{разг. min}}) + c_\eta / \eta_{\text{цикл}}$$

и проанализируем влияние весовых коэффициентов  $c_\tau$  и  $c_\eta$ , отражающих степень важности критериев быстродействия и экономичности и долю каждого из них в значении  $I_0$ . Чтобы сделать возможным принципиальное решение задачи, свяжем весовые коэффициенты между собой, чтобы ограничить число возможных решений, примем  $c_\eta = 1 - c_\tau$ . При этом выбор значения одного коэффициента автоматически определяет значение другого, так как их сумма равна 1.

Варьируя значения одного весового коэффициента, а также значения однозначно связанного с ним другого коэффициента, мы как бы меняем точку зрения на степень важности критериев быстродействия и экономичности. На рис. 6 приведены зависимости обобщенного критерия  $I_0$  от коэффициента загрузки  $k_p$  при различных соотношениях весовых коэффициентов: кривая 1 соответствует  $c_\tau = 1$  и  $c_\eta = 0$ , т.е. при расчете мощности двигателя пренебрегают экономическими качествами; кривая 2 соответствует  $c_\tau = 0$  и  $c_\eta = 1$ , т.е. при расчете пренебрегают критерием быстродействия. В качестве примера сформирована (кривая 3) зависимость обобщенного критерия  $I_0(k_p)$  при одинаковой степени важности критериев динамических и экономических качеств  $c_\tau = c_\eta = 0,5$ , при которой оптимальное значение

$k_{\text{ронт}} = 0,5$  (см. рис. 6). При этом рекомендуемая мощность двигателя вдвое превышает мощность сопротивления рабочей машины:  $W_{\text{дв}} = 2W_{\text{сопр}}$ .

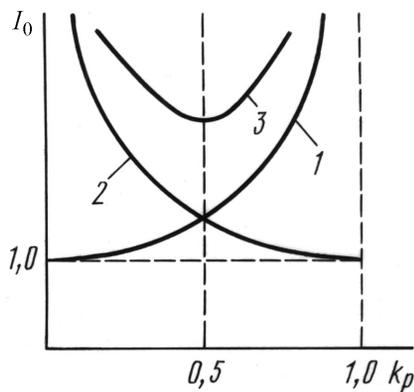
Иная точка зрения и другие значения весовых коэффициентов, естественно, дадут другие значения  $W_{\text{дв}}$ .

**Заключение.** Основные свойства машины закладываются в процессе проектирования, причем расчеты по критериям прочности и долговечности, как правило, не влияют на расход энергии при эксплуатации. На экономические характеристики машины оказывает влияние ряд факторов, таких как КПД рабочей машины, двигателя и передаточного механизма. Первым условием возможности повышения экономичности машин в процессе проектирования является выбор экономичных двигателя и рабочей машины. Но это условие является необходимым, но недостаточным; его выполнение обеспечит только потенциальную возможность повышения экономичности. Для практической реализации этой возможности необходимо совместить экономичные режимы двигателя и рабочей машины согласуя их характеристики путем выбора оптимальных параметров передаточного механизма [7].

При проектировании, как правило, принимается допущение о том, что внешние условия работы одинаковы для всех вариантов проектируемых машин. Это снимает ряд непреодолимых проблем и позволяет сосредоточить усилия проектировщика на решении внутреннего вопроса структурного и параметрического синтеза машинного агрегата, состоящего из двигателя, передаточного механизма и рабочей машины.

При проектировании часто вводят в рассмотрение не режим работы, а идеализированный цикл работы машины. Например, в Европе для оценки экологической опасности ДВС, связанной с наличием токсичных веществ в отходящих газах, вводят в рассмотрение ездовой цикл ДВС, характеризующийся последовательностью работы на режимах разной мощности и скорости вращения.

Повышение экономичности машин при эксплуатации закладывается уже на стадии проектирования. Но при проектировании эти принципы не так очевидны и совсем не просты в техническом исполнении. Однако, несмотря на различие проектируемых машин, эти принципы носят универсальный характер:



**Рис. 6.** Зависимость обобщенного критерия оптимальности от  $k_p$ : кривая 1 –  $c_\tau = 1$  и  $c_\eta = 0$ ; кривая 2 –  $c_\tau = 0$  и  $c_\eta = 1$ ; кривая 3 –  $c_\tau = c_\eta = 0,5$

1. Если машина работает в неустановившемся режиме с частым чередованием циклов разгона и торможения, то увеличение подвижных масс машины приведет к возрастанию потерь накопленной кинетической энергии и затраченной работы двигателя и, тем самым, к снижению общей экономичности цикла.

2. Машины с двигателями нескольких типов, так называемые гибридные машины, оснащенные ДВС, электродвигателями и устройствами аккумулирования энергии, свободны от недостатков повышения расхода энергии на неустановившихся режимах работы. Пиковые потребности в развиваемой мощности могут покрываться за счет аккумулированной энергии, а ДВС может не следовать за переходными режимами в других агрегатах и работать на экономичном установившемся режиме [6].

3. Особое внимание следует уделять выбору номинальной мощности двигателя, экономичность которого может непропорционально ухудшаться при снижении развиваемой в условиях эксплуатации мощности. Например, установка в машине ДВС с излишней по сравнению с оптимальной мощностью приведет к перерасходу топлива при эксплуатации на установившихся и переходных режимах работы. Таким образом, задача обеспечения экономичности машины на стадии проектирования заключается в оптимальном выборе мощности двигателя, оптимальном выборе передаточного механизма между двигателем и рабочим органом машины.

4. Добиться снижения установленной номинальной мощности двигателя и снижения расхода энергии можно, применяя накопительные устройства для компенсации пиковых нагрузок. В некоторых случаях можно добиться снижения номинальной мощности двигателя и расхода энергии более эффективным способом, применяя разгружающие устройства для уменьшения пиковых нагрузок.

5. Значительные резервы повышения экономичности машин при эксплуатации могут быть реализованы при параллельной работе машин и отключении части их по мере снижения нагрузки.

6. При работе на переходных режимах снижение затраченной работы двигателя в период разгона и потерянной кинетической энергии путем изменения момента времени переключения с разгона на торможение является универсальным приемом повышения КПД неустановившегося цикла “разгон–торможение”.

7. Нельзя допускать уменьшение расхода энергии в ущерб безопасности работы машины.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фролов К. В. Современные проблемы теории машин и механизмов // Тр. МВТУ № 408. – М.: МВТУ, 1984. – С. 2–8.

2. **Теплотехника:** Учеб. для вузов / А.М.Архаров, И.А.Архаров, В.Н.Афанасьев, А.М.Кутепов и др.; Под общ. ред. А.М.Архарова и В.Н.Афанасьева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2004. – 712 с.
3. **Двигатели внутреннего сгорания:** Системы поршневых и комбинированных двигателей: Учеб. для вузов / С.И.Ефимов, Н.А.Иващенко, В.И.Крутов и др.; Под общ. ред. М.Г.Круглова. – 3-е изд. – М.: Машиностроение, 1985. – 456 с.
4. **Аттетков А. В., Галкин С. В., Зарубин В. С.** Методы оптимизации. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2003. – 439 с.
5. **Левитский Н. И.** Теория механизмов и машин. – М.: Наука, 1979. – 574 с.
6. **Леонов И. В., Леонов Д. И., Головин О. В.** Повышение экономичности машин рекуперацией энергии // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер. “Машиностроение”. – 2005. – № 1. – С. 63–72.
7. **Чудаков Е. А.** Теория автомобиля. – М.: ГНТИ, 1950. – 340 с.

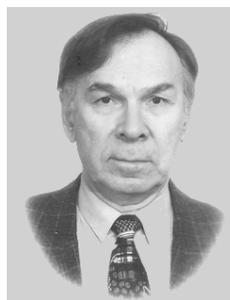
Статья поступила в редакцию 15.12.2006

Дмитрий Игоревич Леонов родился в 1969 г., окончил в 1994 г. МГТУ им. Н.Э.Баумана. Канд. техн. наук, ассистент кафедры “Теория механизмов и машин” МГТУ им. Н.Э.Баумана. Автор более 20 научных работ в области проектирования механизмов машин.



D.I. Leonov (b. 1969) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 1994. Ph. D. (Eng.), assistant of the “Theory of Mechanisms and Machines” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 20 publications in the field of design of mechanisms of machines.

Игорь Владимирович Леонов родился в 1937 г., окончил в 1961 г. МВТУ им. Н.Э.Баумана. Д-р техн. наук, профессор кафедры “Теория механизмов и машин” МГТУ им. Н.Э.Баумана. Автор более 200 научных работ в области управления и проектирования двигателей внутреннего сгорания.



I.V. Leonov (b. 1937) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1961. D. Sc. (Eng.), professor of “Theory of Mechanisms and Machines” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 200 publications in the field of control and design of internal combustion engines.