



УДК 631.3.004.67

С.Ю. Журавлев

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ МАШИННО-ТРАКТОРНЫХ АГРЕГАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ

В статье обоснована возможность использования генетических алгоритмов с целью нахождения оптимальных характеристик работы трактора и его двигателя в условиях воздействия переменных внешних факторов на мобильный МТА.

Представлены основные положения методики оптимизации характеристик двигателя и трактора с применением генетических алгоритмов, а также с учетом особенностей целевых функций для расчета средних значений параметров трактора и его двигателя.

Ключевые слова: машинно-тракторный агрегат, методика, оценка, целевая функция, эффективность функционирования, математическое ожидание, энергетические показатели, генетические алгоритмы.

S.Yu. Zuravlyov

OPTIMIZATION TECHNIQUE OF MTA PARAMETERS AND OPERATING MODES WITH THE GENETIC ALGORITHM USE

The possibility of the genetic algorithm use for the purpose of finding optimum characteristics of tractor work and its engine in the conditions of variable external factor impact on mobile MTA is substantiated in the article.

Basic provisions of the optimization technique of the engine and tractor characteristics with the genetic algorithm application, also taking into account target function peculiarities for calculating the average values of tractor and its engine parameters are presented.

Key words: machine-tractor aggregate, technique, assessment, target function, functioning efficiency, mathematical expectation, power indices, genetic algorithms.

Введение. В процессе решения определенных технических задач функционирования сложных систем обычно возникает проблема установления функциональной зависимости выходных параметров системы от входных воздействий. Задача описания данной зависимости с помощью классических аналитических методов также сложна. Все это значительно затрудняет и ставит под сомнение применение классических методов оптимизации работы сложных технических систем, так как большинство из них основываются на использовании противоречивой информации о характере поведения целевой функции. Таким образом, встает вопрос о применении более адекватных или менее требовательных методов оптимизации и в то же время более эффективных. В качестве подобных методов могут быть использованы так называемые эволюционные методы, или генетические алгоритмы (ГА), в рамках которых применяется моделирование процессов на основе природной эволюции [1].

Целью исследований является совершенствование методики оптимизации параметров и режимов работы мобильных машинно-тракторных агрегатов (МТА) с использованием метода генетического программирования.

Для этого необходимо решить следующие задачи:

1. Обосновать возможность использования эволюционных методов для оптимизации энергетических показателей функционирования МТА.
2. Рассмотреть основные положения методики оптимизации характеристик двигателя и трактора с применением ГА.

Методы и результаты исследований. ГА наиболее эффективны при оптимизации многопараметрических, многоэкстремальных функций. Оптимизация функционирования сложных механических систем – это

прежде всего поиск оптимума, зависящего от ряда входных параметров или от значения определенного параметра, при котором достигается наиболее приемлемый результат оптимизации. Преимущество ГА заключается в его способности манипулировать многими параметрами или переменными одновременно, находя при этом наиболее рациональное решение задачи.

Рассмотрим общую задачу условной оптимизации

$$\max (\min) f(x), x = (x_1, x_2, \dots, x_N) \text{ и } x_i \in [a, b] \quad i=\{1, 2 \dots N\}, \quad (1)$$

где $f(x)$ – максимизируемая (минимизируемая) целевая функция, имеющая один глобальный экстремум либо ограниченное число экстремумов. Предполагается, что о функции $f(x)$ известно то, что на переменные x налагаются ограничения в виде некоторой области определения. Прочая дополнительная информация о характере функции и ее свойствах (дифференцируемость, непрерывность, свойства Липшица и т.д.) предполагается неизвестной и не учитывается в процессе поиска.

Под решением задачи (1) будем понимать вектор $x = (x_1, x_2, \dots, x_N)$. Оптимальным решением задачи (1) будем считать вектор x^* , при котором целевая функция $f(x)$ принимает максимальное (минимальное) значение [6].

Практически всегда оптимизируемая функция обладает каким-либо свойством (свойствами): многоэкстремальность, алгоритмическое задание, сложная конфигурация допустимой области, наличие нескольких типов переменных. Это приводит к необходимости применения специализированных методов, к которым и относятся эволюционные и генетические алгоритмы, хорошо зарекомендовавшие себя в ситуациях, когда применение стандартных методов оптимизации крайне затруднено.

Данную методику можно применить к задаче определения оптимальных значений параметров работы МТА с целью минимизации энергозатрат. Под целевыми функциями здесь рассматриваются зависимости для расчета средних значений важнейших энергетических показателей двигателя и трактора, входящего в состав мобильного МТА, который выполняет технологические операции по возделыванию сельскохозяйственных культур [1]. Использование ГА позволяет найти «наилучшие» значения переменных оптимизационной задачи, использование которых дает возможность установления оптимальных характеристик двигателя, трактора и МТА в целом.

Средние значения мощности дизельного двигателя трактора с учетом переменных внешних воздействий на МТА находим с помощью выражения [2,3]

$$\bar{N}_e = c \left[0,5(a^* \bar{M}_K + b^* \bar{M}_K^2 + b^* \sigma_M^2) - (a_1^* M_K + b_1^* \bar{M}_K^2 + b_1^* \sigma_M^2) \Phi(t_H) + b_1^* \phi(t_H) \bar{M}_K \sigma_M \right], \quad (2)$$

где $a^* = A_1^* + A_2^*$, $a_1^* = A_2^* - A_1^*$, $b^* = B_1^* + B_2^*$, $b_1^* = B_2^* - B_1^*$, $c = 9550^{-1}$;

$$A_1^* = n_x; A_2^* = n_H + \frac{(n_H - n_{min})}{(k-1)}; B_1^* = \frac{(n_H - n_x)}{M_H}; B_2^* = \frac{(n_{min} - n_H)}{(M_{max} - M_H)}.$$

n_x , n_H , n_{min} , M_H и M_{max} – переменные, подлежащие вводу в определенных границах, причем $M_{max} = M_H \times (1,15 \dots 1,20)$;

$$k = \frac{M_{max}}{M_H}, \text{ данный коэффициент меняется в зависимости от значений } M_{max};$$

$$\Phi(t_H) = (2\pi)^{-1/2} \int_0^{t_H} e^{-t^2/2} dt \text{ – функция Лапласа};$$

$$\phi(t_H) = (2\pi)^{-1/2} e^{-0,5t_H^2} \text{ – плотность распределения аргумента } t_H;$$

$$t_H = (M_H - \bar{M}_K / \sigma_M);$$

σ_M – среднее квадратическое отклонение крутящего момента на валу двигателя.

Далее, подставляя в формулу (2) различные значения всех названных переменных, находим \bar{N}_e , учитывая при этом, что M_{\max} меняется в пределах $M_{\max} = M_H \times (1,15 \dots 1,20)$ последовательно, т.е. начинаем расчет от 1,15 с последующим возрастанием до 1,2.

Для получения σ_M используем формулу

$$\sigma_M = \nu_M \bar{M}_K, \quad (3)$$

где ν_M – коэффициент вариации крутящего момента на валу двигателя, $\nu_M = (0 \dots 0,33)$;

\bar{M}_K – среднее значение крутящего момента на валу двигателя трактора.

Средние значения часового расхода топлива для дизельного двигателя рассчитываем по формуле [2,3]

$$\bar{G}_T = 0,5(a + b\bar{M}_K) - (a_1 + b_1\bar{M}_K)\Phi(t_H) + b_1\varphi(t_H)\sigma_M \quad (4)$$

где $a = A_1 + A_2$, $a_1 = A_2 - A_1$, $b = B_1 + B_2$, $b_1 = B_2 - B_1$;

$$A_1 = G_{TX}; A_2 = G_{TH} + \left[\frac{G_{TH} - G_{TO}}{M_H} \right] (K - 1); B_1 = \left[\frac{G_{TH} - G_{TX}}{M_H} \right];$$

$$B_2 = - \left[\frac{G_{TH} - G_{TO}}{M_H} \right] (K - 1);$$

здесь G_{TX} , G_{TH} , M_H , M_{\max} – переменные, подлежащие вводу в установленных границах.

$$G_{mo} = \frac{1,1G_{TH} \cdot K}{K_{об}}, \quad (5)$$

где G_{TH} – часовой расход топлива кг/кВт;

K – коэффициент приспособляемости;

$K_{об}$ – коэффициент приспособляемости двигателя по оборотам, для вновь проектируемых двигателей рекомендуется принимать $K_{об} = 1,25 \dots 1,35$;

$$K = \frac{M_{\max}}{M_H}, \text{ данный коэффициент меняется в зависимости от значений } M_{\max};$$

$$M_{\max} = M_H \times (1,15 \dots 1,20);$$

$$\Phi(t_H) = (2\pi)^{-1/2} \int_0^{t_H} e^{-t^2/2} dt \text{ – функция Лапласа};$$

$$\varphi(t_H) = (2\pi)^{-1/2} e^{-(0,5t_H^2)} \text{ – плотность распределения аргумента } t_H.$$

Подставляя в формулу (4) различные значения всех названных переменных, находим \bar{G}_T .

Математическое ожидание часовой производительности МТА определяем следующим образом [2]:

$$M(W_q) = C_{w1} M(N_e), \quad (6)$$

где $M(W_q)$ – математическое ожидание производительности агрегата, га/ч;

$$C_{w1} = 0,36\eta_T \tau K_a^{-1};$$

η_T – тяговый КПД трактора;

K_a – удельное сопротивление агрегата, кН/м;

τ – степень использования времени работы агрегата, кН/м;

$M(N_e)$ – математическое ожидание эффективной мощности двигателя, кВт.

Математическое ожидание эффективной мощности $M(N_e)$ для двигателя постоянной мощности находим с помощью формулы [4]

$$M(N_e) = c \left[0,5 \left(a \cdot \bar{M}_K + b \cdot \bar{M}_K^2 + b \cdot \sigma_M^2 \right) + \left(a_1 \cdot \bar{M}_K + b_1 \cdot \bar{M}_K^2 + b_1 \cdot \sigma_M^2 \right) \Phi(t_H) + \right. \\ \left. + \left(a_2 \cdot \bar{M}_K + b_2 \cdot \bar{M}_K^2 + b_2 \cdot \sigma_M^2 \right) \Phi(t_H) - \sigma_M \left\{ b_1 \cdot \varphi(t_H) \bar{M}_K + b_2 \cdot \varphi(t_H) \bar{M}_K \right\} \right], \quad (7)$$

где \bar{M}_K – текущее среднее значение крутящего момента, Н·м;

c – коэффициент, равен 9550^{-1} ;

$\Phi(t_H) = \sqrt{\pi}^{-1/2} \int_0^{t_H} e^{-t^2/2} dt$ – функция Лапласа для $Y = f(M_K)$;

$\varphi(t_H) = \sqrt{\pi}^{-1/2} \exp(-0,5t_H^2)$ – плотность распределения аргумента t_H ;

$\Phi(t_H) = \sqrt{\pi}^{-1/2} \int_0^{t_H} e^{-t^2/2} dt$ – функция Лапласа для $Y = f(M_K)$;

$\varphi(t_H) = \sqrt{\pi}^{-1/2} \exp(-0,5t_H^2)$ – плотность распределения аргумента t_H ;

$$t_H = \frac{M_H - \bar{M}_K}{\sigma_M}, \quad t_H = \frac{M_H - \bar{M}_K}{\sigma_M};$$

σ_M – стандарт крутящего момента, Н·м;

M_H – номинальное значение крутящего момента, Н·м;

M_H – предельное значение крутящего момента, Н·м;

$a_1, b_1, a_2, b_2, a_3, b_3$ – расчетные коэффициенты, определяемые при аппроксимации характери-

стики двигателя в зависимости от крутящего момента на коленчатом валу (табл. 1) [4].

Таблица 1

Коэффициенты для расчета математических ожиданий частоты вращения и эффективной мощности двигателя постоянной мощности

Коэффициент	Расчетная формула
1	2
A_1	n_x
A_2	$n_H + n_H - n_{\Pi} / \kappa_2 - 1$
A_3	$n_{\Pi} + n_{\Pi} - n_{min} / \kappa_1 - 1$
B_1	$- n_x - n_H / M_H$
B_2	$- n_H - n_{\Pi} / M_{\Pi} - M_H$
B_3	$- n_{\Pi} - n_{min} / M_{max} - M_{\Pi}$
a	$A_1 + A_3$

Окончание табл. 1

1	2
a_1^*	$A_1 - A_2$
a_2^*	$A_2 - A_3$
b^*	$B_1 + B_3$
b_1^*	$B_1 - B_2$
b_2^*	$B_2 - B_3$

Примечание. $n_x, n_H, n_{II}, n_{min}$ – частота вращения вала двигателя соответственно: холостого хода, при номинальном моменте, при предельном моменте и при максимальном моменте, $мин^{-1}$; $\kappa_1 = M_{max}/M_{II}$; $\kappa_2 = M_{II}/M_H$; $M_{max} = M_H \times (1,35...1,6)$; $M_{II} = M_H \times (1,15...1,3)$.

Для расчета математических ожиданий часового расхода топлива двигателя постоянной мощности используем следующее выражение:

$$\bar{G}_T = 0,5 \left(a_1^* + b^* M_{\kappa} \right) \left(a_2^* + b_1^* M_{\kappa} \right) \Phi(t_n) + (a_2^* + b_2^* M_{\kappa}) \Phi(t_n) - \sigma_P \{ (b_1^* \varphi(t_n) + b_2^* \varphi(t_n)) \}, \quad (8)$$

где \bar{G}_T – математическое ожидание часового расхода топлива, кг/ч;

$a_1^*, b_1^*, a_2^*, b_2^*, a^*, b^*$ – расчетные коэффициенты, определяемые при аппроксимации тяговой характеристики трактора по расходу топлива (табл. 2).

Таблица 2

Коэффициенты для расчета математических ожиданий часового расхода топлива трактора с двигателем постоянной мощности

Коэффициент	Расчетная формула
A_1^*	G_{TX}
A_2^*	$G_{TH} + G_{TH} - G_{TII} / \kappa_2 - 1$
A_3^*	$G_{TII} + G_{TII} - G_{TO} / \kappa_1 - 1$
B_1^*	$- G_{TX} - G_{TH} / M_H$
B_2^*	$- G_{TII} - G_{TH} / M_{II} - M_H$
B_3^*	$- G_{TII} - G_{TO} / M_{max} - M_{II}$
a^*	$A_1^* + A_3^*$
a_1^*	$A_1^* - A_2^*$
a_2^*	$A_2^* - A_3^*$
b^*	$B_1^* + B_3^*$
b_1^*	$B_1^* - B_2^*$
b_2^*	$B_2^* - B_3^*$

Примечание. $G_{TX}, G_{TH}, G_{TII}, G_{TO}$ – часовой расход топлива соответственно: холостого хода, номинальный, для предельного крутящего момента, при максимальном крутящем моменте, кг/ч; $\kappa_1 = M_{max}/M_{II}$; $\kappa_2 = M_{II}/M_H$.

Для расчета математических ожиданий часовой производительности МТА в зависимости от переменной силы тяги трактора используется следующее выражение [2]:

$$M(W_{ч}) = C_{w2} M(N_{кр}), \quad (9)$$

где $M(W_{ч})$ – математическое ожидание производительности агрегата, га/ч;

$$C_{w2} = 0,36\tau K_a^{-1};$$

K_a – удельное сопротивление агрегата, кН/м;

τ – степень использования времени работы агрегата;

$M(N_{кр})$ – математическое ожидание тяговой мощности, кВт.

Математическое ожидание тяговой мощности в трактора с двигателем постоянной мощности находим следующим образом [4]:

$$M(N_{кр}) = \left[\begin{aligned} &0,5 \left(a \overset{\circ}{P}_{кр} + b \overset{\circ}{P}_{кр}^{-2} + b \overset{\circ}{\sigma}_P^2 \right) + \left(a_1 \overset{\circ}{P}_{кр} + b_1 \overset{\circ}{P}_{кр}^{-2} + b_1 \overset{\circ}{\sigma}_P^2 \right) \Phi(\beta_H) + \\ &+ \left(a_2 \overset{\circ}{P}_{кр} + b_2 \overset{\circ}{P}_{кр}^{-2} + b_2 \overset{\circ}{\sigma}_P^2 \right) \Phi(\beta_{II}) - \sigma_P \{ b_1 \overset{\circ}{\varphi}(\beta_H) \bar{P}_{кр} + b_2 \overset{\circ}{\varphi}(\beta_{II}) \bar{P}_{кр} \} \end{aligned} \right], \quad (10)$$

где $\Phi(\beta_{II}) = \sqrt{\pi} \int_0^{\beta_{II}} e^{-\beta^2/2} d\beta$ – функция Лапласа для аргумента β_{II} ;

$\Phi(\beta_H) = \sqrt{\pi} \int_0^{\beta_H} e^{-\beta^2/2} d\beta$ – функция Лапласа для аргумента β_H ;

$\varphi(\beta_{II}) = \sqrt{\pi} \exp\left\{-0,5\beta_{II}^2\right\}$ – плотность распределения аргумента β_{II} ;

$\varphi(\beta_H) = \sqrt{\pi} \exp\left\{-0,5\beta_H^2\right\}$ – плотность распределения аргумента β_H ;

$\bar{P}_{кр}$ – текущее среднее значение силы тяги, кН;

σ_P – стандарт силы тяги трактора;

$$\beta_{II} = \frac{P_{кр,II} - \bar{P}_{кр}}{\sigma_P}, \quad \beta_H = \frac{P_{кр,H} - \bar{P}_{кр}}{\sigma_P};$$

a_1, b_1, a, b, a_2, b_2 – расчетные коэффициенты, определяемые при аппроксимации тяговой характеристики трактора (таблица 3);

$\bar{P}_{кр}$ – текущее среднее значение силы тяги, кН;

$P_{кр,II}$ – значение силы тяги трактора на данной передаче, соответствующее предельному крутящему моменту, кН;

$P_{кр,H}$ – номинальное значение силы тяги трактора на данной передаче, кН.

Коэффициенты для расчета математических ожиданий тяговой мощности трактора с двигателем постоянной мощности

Коэффициент	Расчетная формула
A_1	$V_{p.x}$
A_2	$V_{p.n} + V_{p.n} - V_{p.n} / \kappa_2 - 1$
A_3	$V_{p.n} + V_{p.n} - V_{p.min} / \kappa_1 - 1$
B_1	$- V_{p.x} - V_{p.n} / P_{кр.n}$
B_2	$- V_{p.n} - V_{p.n} / P_{кр.n} - P_{кр.n}$
B_3	$- V_{p.n} - V_{p.min} / P_{кр.max} - P_{кр.n}$
a	$A_1 + A_3$
a_1	$A_1 - A_2$
a_2	$A_2 - A_3$
b	$B_1 + B_3$
b_1	$B_1 - B_2$
b_2	$B_2 - B_3$

Примечание: $V_{p.n}, V_{p.x}, V_{p.n}, V_{p.min}$ – скорость движения трактора соответственно: холостого хода, номинальная, при $P_{кр.n}$ и при $P_{кр.max}$, км/ч; $\kappa_1 = P_{кр.max}/P_{кр.n}$; $\kappa_2 = P_{кр.n}/P_{кр.n}$; $P_{кр}$ – сила тяги на крюке, кН; $P_{кр.n}$ – предельная сила тяги, соответствующая максимальной тяговой мощности, кН; $P_{кр.n}$ – номинальная сила тяги, кН; $P_{кр.max}$ – максимальная сила тяги, кН; $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3$ – постоянные величины и угловые коэффициенты, определяемые по тяговой характеристике трактора.

Величину $P_{кр.max}, P_{кр.n}, P_{кр.n}$ находим с помощью следующего выражения при известных M_{max}, M_n и M_n :

$$P_{кр.max} = \frac{M_{max} \cdot i_{mp} \cdot \eta_{mp} \cdot 10^{-3}}{r_k} - (m_3 \cdot g \cdot f), \quad (11)$$

где i_{mp} – передаточное число трансмиссии;

η_{mp} – механический КПД трансмиссии;

r_k – расчетный диаметр ведущего колеса или кинематический радиус ведущей звездочки;

m_3 – эксплуатационная масса трактора;

f – коэффициент сопротивления качению;

g – ускорение силы тяжести.

В выражении (10) $M_{max} = M_n \times (1,35 \dots 1,6)$ последовательно.

Далее определяем $P_{кр.n}, P_{кр.n}$.

Скорость движения трактора V_0 на определенной передаче рассчитываем по формуле

$$V_{\partial} = \frac{\pi \cdot n_{\partial}}{30} \cdot \frac{r_k}{i_{mp}} \cdot \delta \quad (12)$$

где n_{∂} – частота вращения коленчатого вала на данной передаче, $мин^{-1}$;

δ – буксование трактора, допустимое буксование трактора в расчетах принимают: колесных с формулой 4К2 – 16%, или 0,16, с формулой 4К4 – 14%, или 0,14, гусеничных – 5%.

Аналогично рассчитываются математические ожидания часового расхода топлива \bar{G}_T [5]

$$\bar{G}_T = 0,5 \left(a_1^* + b_1^* P_{кр} \right) \left(a_2^* + b_2^* P_{кр} \right) \Phi(t_n) + (a_2^* + b_2^* P_{кр}) \Phi(t_n) - \sigma_P \{ (b_1^* \varphi(t_n) + b_2^* \varphi(t_n)) \}, \quad (13)$$

где \bar{G}_T – математическое ожидание часового расхода топлива, кг/ч;

$a_1^*, b_1^*, a_2^*, b_2^*, a^*, b^*$ – расчетные коэффициенты, определяемые при аппроксимации тяговой характеристики трактора по расходу топлива (табл. 4).

Таблица 4

Коэффициенты для расчета математических ожиданий часового расхода топлива трактора с двигателем постоянной мощности

Коэффициент	Расчетная формула
A_1^*	$G_{ТХ}$
A_2^*	$G_{ТН} + G_{ТН} - G_{ТП} / \kappa_2 - 1$
A_3^*	$G_{ТП} + G_{ТП} - G_{ТО} / \kappa_1 - 1$
B_1^*	$- G_{ТХ} - G_{ТН} / P_{кр.н}$
B_2^*	$- G_{ТП} - G_{ТН} / P_{кр.л} - P_{кр.н}$
B_3^*	$- G_{ТП} - G_{ТО} / P_{кр.мах} - P_{кр.л}$
a^*	$A_1^* + A_3^*$
a_1^*	$A_1^* - A_2^*$
a_2^*	$A_2^* - A_3^*$
b^*	$B_1^* + B_3^*$
b_1^*	$B_1^* - B_2^*$
b_2^*	$B_2^* - B_3^*$

Примечание: $G_{ТХ}, G_{ТН}, G_{ТП}, G_{ТО}$ – часовой расход топлива соответственно: холостого хода, номинальный, для предельного крутящего момента, при максимальном крутящем моменте, кг/ч; $\kappa_1 = P_{кр.мах} / P_{кр.л}$; $\kappa_2 = P_{кр.л} / P_{кр.н}$.

Математическое ожидание удельного тягового расхода топлива \bar{g}_e находим по формуле

$$\bar{g}_e = \frac{\bar{G}_T}{N_{кр}}, \quad (14)$$

где \bar{G}_T – математическое ожидание часового расхода топлива, кг/ч;

\bar{N}_{kp} – математическое ожидание тяговой мощности, кВт.

Влияние колебаний силы тяги на тяговую мощность трактора с классической тяговой характеристикой оценивается с помощью формулы [2]

$$\bar{N}_{kp} = \bar{P}_{kp} \bar{V}_p + K_{pv}, \quad (15)$$

где \bar{N}_{kp} – математическое ожидание тяговой мощности;

$\bar{V}_p = 0,5(a^{**} + b^{**} \bar{P}_{kp}) - (a_1^{**} + b_1^{**} \bar{P}_{kp})\Phi(t_H) + b_1^{**} \varphi(t_H)\sigma_P$ – математическое ожидание рабочей скорости движения трактора на данной передаче, м/с;

$K_{pv} = 0,5b^{**} - b_1^{**} \Phi(t_H) \sigma_P^2$ – корреляционный момент; $A_1^{**} = V_x$;
 $A_2^{**} = V_{p.n} + [V_{p.n} - V_{min}] \epsilon_1 - 1$; $B_1^{**} = -[V_x - V_{p.n}] P_{кр.н}$; $B_2^{**} = -[V_{p.n} - V_{min}] P_{кр.н} \epsilon_1 - 1$ – коэффициенты, определяемые по типовой характеристике трактора;

$K_1 = \frac{P_{max}}{P_{кр.н}}$ – коэффициент максимальной нагрузки трактора на данной передаче;

$$a^{**} = A_1^{**} + A_2^{**}, a_1^{**} = A_2^{**} - A_1^{**}, b^{**} = B_1^{**} + B_2^{**}, b_1^{**} = B_2^{**} - B_1^{**};$$

$\Phi(t_H)$ и $\varphi(t_H)$ – функции аргумента $t_H = (P_{кр.н} - \bar{P}_K) / \sigma_P$;

\bar{P}_K, σ_P – среднее значение и среднеквадратическое отклонение тяговой силы трактора на данной передаче, кН;

$P_{кр.н}$ – номинальное значение силы тяги, P_{max} – максимальное значение силы тяги, кН.

Для расчета математического ожидания удельного тягового расхода топлива \bar{g}_{kp} используется соотношение [2]

$$\bar{g}_{kp} = \bar{G}_T / \bar{N}_{kp}, \quad (16)$$

где $\bar{G}_T = 0,5(a' + b' \bar{P}_{kp}) - (a_1' + b_1' \bar{P}_{kp})\Phi(t_H) + b_1' \varphi(t_H)\sigma_P$ – математическое ожидание секундного расхода топлива на данной передаче, кг/ч;

\bar{N}_{kp} – математическое ожидание тяговой мощности трактора на данной передаче, кВт;

$a' = A_1' + A_2', a_1' = A_2' - A_1', b' = B_1' + B_2', b_1' = B_2' - B_1'$ – коэффициенты, определяемые по типовой тяговой характеристике;

$$A'_1 = G_{TX}; A'_2 = G_{TH} + \left[\frac{G_{TH} - G_{TO}}{K_1 - 1} \right] P_{кр.н}; B'_1 = \left[\frac{G_{TH} - G_{TX}}{K_1 - 1} \right] P_{кр.н};$$

$$B'_2 = - \left[\frac{G_{TH} - G_{TO}}{K_1 - 1} \right] P_{кр.н}; K_1 = \frac{P_{max}}{P_{кр.н}}; G_{TX}, G_{TO}, G_{TH}, P_{max}, P_{кр.н} - \text{данные}$$

тяговой характеристики трактора.

В общем виде работу генетического алгоритма можно представить следующим образом [6]:

1. Инициализировать случайным образом популяцию решений, т.е. ввести значения всех переменных оптимизационной задачи исходя из их области определения.

2. С помощью оператора селекции выбрать часть популяции (множество решений целевой функции или родителей) для порождения потомков или новых решений задачи.

3. Применить оператор скрещивания.

4. Новые решения (потомки) подвергаются мутации.

5. Формируется новая популяция: выбрать решения из родителей и потомков.

6. Повторять 2...5, пока не выполнится условие останова.

Для построения эволюционного алгоритма необходимо выполнить следующие шаги:

- выбрать представление решений (способ кодирования фенотипа в генотип);
- решить, как инициализировать популяцию;
- определить основные генетические операторы;
- выбрать подходящий оператор мутации;
- выбрать подходящий оператор скрещивания;
- выбрать способ оценки пригодности индивида (варианта решения задачи);
- решить, как управлять нашей популяцией;
- решить, как выбрать индивидов-родителей;
- решить, как выбрать индивидов для замены;
- решить, когда остановить алгоритм.

Подобно тому как природный хромосомный материал представляет собой линейную последовательность различных комбинаций четырех нуклеотидов, решения в ГА представляются в виде хромосом (генотипов). Генотип – строка конечной длины, состоящая из генов, представленных символами некоторого алфавита.

В ГА существует строгое различие между фенотипом (решением, выраженным в терминах поставленной задачи) и генотипом (хромосомой, представлением решения). ГА работает с генотипом, фенотип служит для определения пригодности индивида (оценки качества решения поставленной задачи), поэтому для работы алгоритма необходимо определить некоторую функцию кодирования ($e : D \rightarrow S$, где D – пространство поиска, S – пространство представлений решений) и функцию декодирования ($e^{-1} : S \rightarrow D$). Таким образом, на самом деле ГА решают не задачу $f(d) \rightarrow \underset{d \in D}{opt}$, где $f : D \rightarrow R^1$, а задачу

$$\mu(s) \rightarrow \underset{s \in S}{opt}, \text{ где } \mu : S \rightarrow R^1 \text{ и } s = e(x), \mu(s) = f(e^{-1}(s)) = f(x). \quad (17)$$

На практике наибольшее распространение получили ГА с бинарным представлением решений. Формально они решают задачу псевдодобулевой оптимизации, т.е.

$$\chi(X) \rightarrow \underset{X \in B_{2n}}{opt}, \text{ где } \chi : B_{2n} \rightarrow R^1. \quad (18)$$

К задачам (17) и (18) сводятся практически любые задачи с дискретными переменными (возможно, выраженные в разных шкалах), а также задачи с непрерывными переменными (заменяя непрерывные пере-

менные дискретными с заданной точностью). Наиболее часто используются стандартное бинарное кодирование и бинарные коды Грея [6].

На шаге инициализации задаются параметры алгоритма: длина хромосомы, размер популяции и др., а также типы и вероятности применения основных генетических операторов (скрещивания, мутации и селекции). Если априорные сведения о пространстве поиска отсутствуют, начальная популяция генерируется случайным образом.

Оператор селекции – оператор, посредством которого индивиды выбираются для порождения потомков или для перехода в следующее поколение. Наиболее приспособленные особи должны выбираться с большей вероятностью для сохранения своих генов в следующем поколении. То есть оператор селекции позволяет сконцентрировать поиск на наиболее многообещающих регионах пространства.

Предложено множество различных схем отбора в ГА. Конкретный тип оператора селекции (а также и других генетических операторов) проектируется исходя из решаемой задачи (например, когда требуется контроль допустимости решений, учет ограничений, в нашем случае это области определения переменных оптимизационной задачи, многокритериальности и т.д.), однако наиболее распространены следующие базовые типы селекции.

В *пропорциональной селекции* вероятность индивида быть отобранным пропорциональна его пригодности. Вероятность вычисляется следующим образом (для задачи минимизации):

$$P(X^i) = \frac{-fitness(X^i) + C}{r * C - \sum_{j=1}^r fitness(X^j)}, \quad (19)$$

где r – размер популяции, $C : P(X^i) \geq 0, \forall i, \sum_{j=1}^r P(X^j) = 1$;

X^i – i -й индивид в популяции;

$fitness(X^i)$ – пригодность индивида X^i ;

Пропорциональная селекция обладает следующими недостатками: преждевременная сходимость и стагнация.

Стагнация возникает, когда на определенном этапе поиска все индивиды получают относительно высокую и примерно равную пригодность, что приводит к очень низкому селективному давлению (наилучшее решение лишь немного предпочитается худшему).

Преждевременная сходимость (проблема супериндивида) возникает, когда на ранних этапах появляется индивид с пригодностью намного большей, чем у других индивидов в популяции, но очень плохой с точки зрения решаемой задачи. Вероятность супериндивида быть отобранным стремится к единице, в то время как вероятности других членов популяции – к нулю. В итоге он копирует себя в следующее поколение и вскоре «широкий» поиск прекращается.

При применении *ранговой селекции* индивиды популяции ранжируются в соответствии с их пригодностью: $R_i < R_j$, если $f(X^i) \leq f(X^j)$. Тогда

$$P(X^i) = \frac{R_i}{\sum_{k=1}^r R_k} = \frac{i}{\sum_{k=1}^r i} = \frac{2i}{r(r+1)}, \quad (20)$$

где $\sum_{j=1}^r P(X^j) = 1$.

Ранговая селекция устраняет недостатки пропорциональной: нет стагнации, так как даже к концу работы алгоритма $P(X^1) \neq P(X^2) \neq \dots$, нет преждевременной сходимости, так как нет индивидов с вероятностью отбора, близкой к единице.

В *турнирной селекции* для отбора индивида создается группа из t ($t \geq 2$) индивидов, выбранных случайным образом. Индивид с наибольшей пригодностью в группе отбирается, остальные – отбрасываются. Параметр t называется размером турнира. Наиболее популярным является бинарный турнир. Этот тип селекции не требует сортировки популяции и вычисления пригодности для всех индивидов. Недостатки: худший индивид никогда не выбирается.

Селекция с усечением. В процессе селекции с усечением с порогом τ только доля τ из всех лучших индивидов может быть отобрана, причем в этой доле каждый имеет одинаковую вероятность отбора.

Элитарная селекция. Как минимум одна копия лучшего индивида всегда переходит в следующее поколение. Преимущества: гарантия сходимости. Недостатки: большой риск захвата локальным оптимумом.

Оператор скрещивания (рекомбинация) – генетический оператор поиска. При скрещивании отобранные индивиды (родители) по заданному правилу передают части своих хромосом. Потомок может унаследовать только те гены, которые есть у его родителей. Существуют различные схемы скрещивания: точечное, равномерное, скрещивание более чем двух родителей и другие. При точечном скрещивании для выбранных родителей выбираются точки разрыва хромосомы, родители определенным образом обмениваются соответствующими участками хромосом. При равномерном – соответствующий ген потомка может быть унаследован от любого родителя с равной вероятностью. Скрещивание осуществляется с вероятностью p_{xover} , иначе с вероятностью $(1 - p_{xover})$ родители клонируются в следующее поколение.

Наиболее популярным типом скрещивания является *одноточечное скрещивание* – случайно выбирается точка разрыва, родительские хромосомы разрываются в этой точке и обмениваются правыми частями (рис. 1).

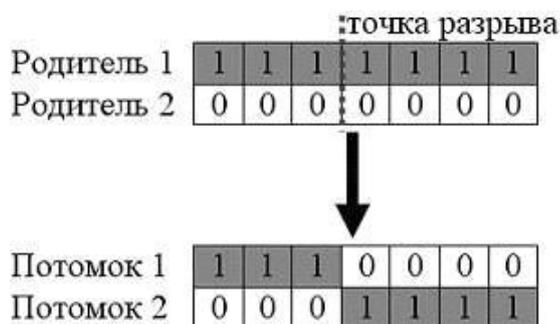


Рис. 1. Одноточечное скрещивание

При *двухточечном скрещивании* хромосома как бы замыкается в кольцо, выбираются две точки разрыва, родители обмениваются частями (рис. 2).

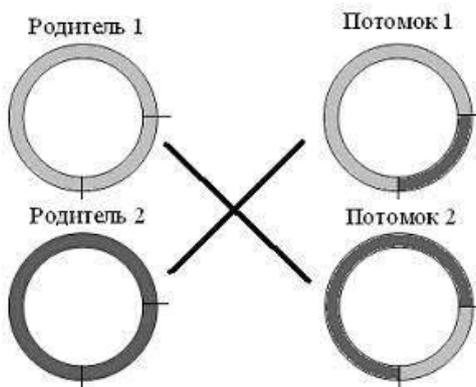


Рис. 2. Двухточечное скрещивание

При равномерном скрещивании потомок может унаследовать с равной вероятностью гены любого из родителей (рис. 3).

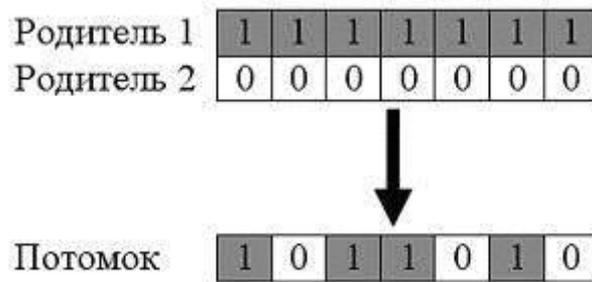


Рис. 3. Равномерное скрещивание

Равномерное скрещивание по всей популяции (uniform gene pool recombination) получается применением равномерного скрещивания ко всем членам популяции, т.е. потомок может унаследовать любой ген, имеющийся в популяции в заданной позиции хромосомы.

Оператор мутации – одноместный оператор поиска, случайное изменение в одном или нескольких генах индивида. В ГА мутация рассматривается как метод восстановления потерянного генетического материала, а не как поиск лучшего решения. Мутация применяется к генам с очень низкой вероятностью $p_m \in [0.001; 0.01]$. Хорошим эмпирическим правилом считается выбор вероятности мутации, равной

$p_m = \frac{1}{n}$, где n – число генов в хромосоме (в среднем хотя бы один ген будет подвержен мутации). В

случае бинарного алфавита мутация состоит в инвертировании случайно выбранных битов (рис. 4).

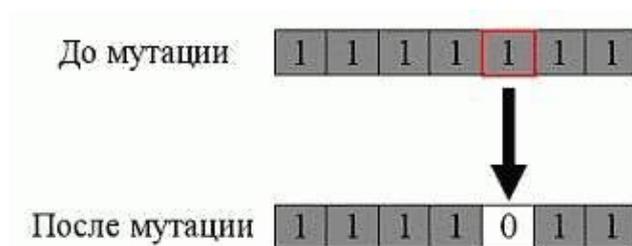


Рис. 4. Пример мутации в ГА

Пригодность индивида – это некоторая количественная оценка качества решения поставленной задачи. Функция пригодности может быть спроектирована с учетом особенностей решаемой задачи (что делает ГА довольно гибким, универсальным). Обычно функция пригодности принимает положительные значения, и значение пригодности максимизируют. В соответствии с значением функции пригодности выбирается «наилучшее» решение задачи или множество «наилучших» (оптимальных) решений.

В общем случае при решении задач безусловной оптимизации в качестве значения функции пригодности может выступать значение оптимизируемого функционала ($fitness(X^i) = \chi(X^i)$) [6]. $\chi(X^i)$ – значение целевой функции в точке X^i .

Выводы

1. Использование эволюционных методов для оптимизации энергетических показателей функционирования МТА позволит эффективно и на новом уровне решать проблему снижения энергозатрат при использовании мобильных агрегатов на различных технологических операциях при производстве сельскохозяйственных культур.

2. Анализ основных положений и теоретических основ методики ГА позволяет сделать выводы о возможности применения ГА в целях оптимизации характеристик двигателя и трактора.

Литература

1. Журавлев С.Ю., Терсков В.А. Применение генетического алгоритма при оптимизации функционирования сложных механических систем // Вестн. КрасГАУ. – 2008. – № 4. – С. 148–153.
2. Агеев Л.Е., Шкрабак В.С., Моргулис-Якушев В.Ю. Сверхмощные тракторы сельскохозяйственного назначения. – Л.: Агротормиздат, 1986. – 415 с.
3. Агеев Л.Е., Бахриев С.Х. Эксплуатация энергонасыщенных тракторов. – М.: Агропромиздат, 1991. – 271 с.
4. Журавлев С.Ю. Влияние переменных внешних факторов на производительность машинно-тракторных агрегатов // Вестн. КрасГАУ. – 2011. – № 7. – С. 148–153.
5. Журавлев С.Ю. Оценка эффективности функционирования мобильных сельскохозяйственных агрегатов с использованием тяговой характеристики трактора // Вестн. КрасГАУ. – 2011. – № 9. – С. 146–151.
6. Семенкин Е.С., Семенкина О.Э., Терсков В.А. Оптимизация технических систем. – Красноярск: Изд-во СибЮИ МВД России, 2000. – 325 с.



УДК 621.43. 004. 67

А.А. Махутов, Т.Е. Бадардинова,
А.Л. Токмакова, А.А. Пестерева

ТРАЕКТОРИЯ ДВИЖЕНИЯ ХОНА ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ГИЛЬЗ АВТОТРАКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МЕТОДОМ РЕМОНТНЫХ РАЗМЕРОВ

В статье приводятся результаты исследований траектории движения хона при восстановлении гильз цилиндров автотракторных двигателей во время ремонта и теоретические исследования действия абразивных брусков на стенки гильз цилиндров. Установлена причинно-следственная связь между сложившейся технологией и искажением геометрической формы гильз цилиндров.

Ключевые слова: дизель, гильза, траектория, хон, развертка, брусок, давление, технология.

А.А. Makhutov, T.E. Badardinova,
A.L. Tokmakova, A.A. Pestereva

THE HONE MOTION TRAJECTORY IN SHELL RENEWAL OF MOTOR AND TRACTOR ENGINES BY REPAIR SIZE METHOD

The research results on the hone motion trajectory in cylinder shell renewal of motor and tractor engines during repair and theoretical research of abrasive block actions towards the walls of cylinder shells are presented in the article. The cause-and-effect relation between the given technology and the geometrical form distortion of cylinder shells is determined.

Key words: engine, shell, trajectory, hone, scan, block, pressure, technology.

Введение. Надежность тракторных дизелей, прошедших капитальный ремонт на сегодняшний день, является актуальной проблемой. Тракторный дизель является тем агрегатом, который обуславливает ресурс трактора в целом. Известно, что 34...45% отказов тракторов приходится на двигатели, причем нормативную наработку выдерживают только 30...40% тракторных дизелей [4, 7].

Надежность дизелей после ремонта значительно ниже, чем у новых дизелей. Ресурс отремонтированных дизелей СМД-62 в 10 раз меньше и не превышает 500 моточасов [5]. Например, фактический ресурс