



УДК 629.114.2

Н.И. Селиванов, А.В. Кузнецов

## СИСТЕМА АДАПТАЦИИ КОЛЕСНЫХ ТРАКТОРОВ ВЫСОКОЙ МОЩНОСТИ К ЗОНАЛЬНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ ПОЧВООБРАБОТКИ

Обоснована структурная схема, разработаны модели и алгоритм системной адаптации колесных тракторов высокой мощности к природно-производственным условиям агротехнической зоны эксплуатации.

**Ключевые слова:** структурная схема, природно-производственные условия, адаптация, операции обработки почвы, параметры-адаптеры, критерии, ограничения.

N.I. Selivanov, A.V. Kuznetsov

## THE SYSTEM OF THE HIGH POWER WHEEL TRACTOR ADAPTATION TO THE ZONAL SOIL-PROCESSING TECHNOLOGIES

The structure chart is substantiated, the system models and algorithm of the high power wheel tractor adaptation to the natural-production conditions of the agrotechnical operation zone are developed.

**Key words:** structure chart, natural-production conditions, adaptation, soil processing operations, parameters adapters, criteria, restrictions.

**Введение.** В общей структурной схеме многоуровневой системы адаптации мобильных энергетических средств к природно-производственным условиям обоснование энергетического потенциала  $(\xi \frac{N}{N} \cdot N_{e3})^*$  и эксплуатационной массы  $m_3$  тракторов для установленных групп родственных операций почвобработки с учетом современных тенденций их развития является главной задачей второго уровня [1].

Методология адаптации трактора к условиям режима рабочего хода предусматривает обоснование структурной схемы, разработку математических моделей и алгоритма оптимизации массоэнергетических параметров для совокупности технологий основной обработки почв.

Определение оптимальных параметров (адаптеров) трактора производится на режимах рабочего хода разных групп родственных операций основной обработки почвы при обоснованных значениях номинальной скорости  $V_{Hi}$  и характеристиках удельного тягового сопротивления  $(K_{oi}, \Delta K_{oi}, v_{Koi})$  рабочих машин-орудий.

**Цель работы.** Обоснование структуры и моделей системной адаптации колесного 4K46 трактора с установленной характеристикой двигателя к природно-производственным условиям.

Достижение поставленной цели предусматривает решение следующих задач:

- 1) обосновать структурную схему системы адаптации эксплуатационных параметров и режимов рабочего хода трактора к зональным технологиям обработки почвы;
- 2) разработать модели и алгоритм оптимизации массоэнергетических параметров трактора для операционных технологий основной обработки почвы.

**Условия и методы исследования.** Эксплуатационные параметры трактора  $N_{e3}$  и  $m_3$  определяются тяговым и скоростным режимами в процессе рабочего хода и рассматриваются как результирующие признаки функционирования при случайном характере тяговой нагрузки с учетом установленных допущений и ограничений:

- а) по энергоёмкости и техническому обеспечению операции основной обработки почвы разделены на три группы, каждую из которых характеризуют удельное тяговое сопротивление  $K_{oi}$  при скорости  $V_0=1,4$  м/с, его приращение от скорости  $\Delta K_i$ , коэффициент вариации  $v_{Koi}$  и рациональный по энергозатратам и агротребованиям интервал рабочей скорости  $\bar{V}_{Hi} \pm \Delta V_i$ ;

б) рациональный тяговый диапазон трактора, ограниченный режимами максимального тягового КПД  $\eta_{max}(\varphi_{крот})$  и допустимого буксования  $\delta_{\delta}(\varphi_{крmax})$ , характеризуется номинальным коэффициентом использования сцепного веса:  $\varphi_{крот} \leq \varphi_{крн} \leq \bar{\varphi}_{кр}$  при  $\bar{\varphi}_{кр} = 0,5(\varphi_{крот} + \varphi_{крmax})$ ;

в) КПД трансмиссии  $\eta_{тр}$  и коэффициент сопротивления качению  $f = f_0 + C(V_H - V_0)$  в заданных условиях равны средним расчетным значениям без учета мощности двигателя и угла наклона поверхности поля ( $\alpha=0$ ).

В основу адаптации современного колесного трактора с установленной характеристикой двигателя ( $N_{\text{еэ}}, K_M, n_H$ ) к режиму рабочего хода отдельных групп родственных операций обработки почвы положено изменение эксплуатационной массы для достижения оптимальных значений показателей технологичности – удельного энергетического потенциала  $(\xi_{\bar{N}} \cdot \mathcal{E})^*$  и удельной материалоемкости  $(m_{\text{уд}} = 10^3 / (\xi_{\bar{N}} \cdot \mathcal{E})^*)$ , обеспечивающих наиболее эффективное его функционирование в составе почвообрабатывающих агрегатов разного технологического назначения.

Оптимальные значения эксплуатационных параметров трактора определяются из условия обеспечения чистой производительности  $W_i^*$ , установленной по экономическим критериям оптимальности [2] для каждой технологической операции почвообработки и определенной длины гона  $l_{Gi}$ , при функционировании в интервале допустимых значений рабочей скорости  $V_{Hi}^* \pm \Delta V_i$  и тяговом диапазоне, соответствующем  $\varphi_{крот} \leq \varphi_{крн} \leq \bar{\varphi}_{кр}$ .

**Результаты исследования и их анализ.** Для повышения эффективности адаптации колёсных 4К46 тракторов с переменными массоэнергетическими параметрами к природно-производственным условиям разработана многоэтапная структурная схема (рис. 1) с обоснованными моделями, критериями оптимальности и ограничениями.

Входными факторами системы на первом этапе адаптации являются рабочая скорость  $V_{Hi}$ , длина гона  $l_{\text{э}}$ , характеристики удельного сопротивления рабочей машины ( $K_{0i}, \Delta K_{0i}, v_{K0i}$ ) и двигателя ( $N_{\text{еэ}}, K_M, n_H$ ). Оптимизации подлежит номинальный коэффициент использования сцепного веса  $\varphi_{крн}$ , характеризующий устойчивое движение трактора по тягово-сцепным свойствам в номинальном тяговом режиме при ограничении  $\delta_{\text{опт}} \leq \delta_H < \delta_{\delta}$  для обобщенной характеристики опорной поверхности.

Критерий оптимальности представляет максимум тягового КПД  $\eta_{max}$ , определяющий условие функционирования трактора в режиме рабочего хода с наивысшей производительностью и наименьшими энергетическими затратами на конкретном почвенном фоне. Оценки составляющих тягового КПД трактора по результатам стендовых и тяговых испытаний или установленных зависимостей формируют перечень и содержание промежуточных задач на данном этапе.

Режим работы трактора по условиям сцепления считается оптимальным, если целевая функция  $\eta_m = f(\varphi_{кр}) \rightarrow \max$ , поэтому математические модели М 1.1 и М 1.2 представляют одно- и двухмерное уравнения (табл.).

#### Модели и алгоритм оптимизации массоэнергетических параметров колесного 4К46 трактора

Этап	Критерии оптимизации	Параметры и модели оптимизации	Ограничения
1	2	3	4
1	$\eta_m = \eta_{тр} \cdot \eta_f \cdot \eta_{\delta} \rightarrow \max$ $\eta_{тр} = \eta_{\text{хх}} \cdot \eta_{\text{ц}}^{n1} \cdot \eta_{\text{к}}^{n2} \cdot \eta_{\text{ш}}^{n3}$ $\eta_f = \varphi_{кр} / (\varphi_{кр} + f)$ $\eta_{\delta} = 1 - a \cdot \varphi_{кр} / (b - \varphi_{кр})$	М 1.1. $\varphi_{крн}^* = b \cdot \delta_H^* / (a + \delta_H^*)$ М 1.2. $\eta_m = \eta_{тр} \left[ \frac{\varphi_{кр}}{(\varphi_{кр} + f)} \right] \left\{ 1 - \left[ \frac{a \cdot \varphi_{кр}}{(b - \varphi_{кр})} \right] \right\}$	$\delta_{\text{опт}} \leq \delta_H^* < 0,15$ $\varphi_{крот} \leq \varphi_{крн}^* \leq 0,5(\varphi_{крот} + \varphi_{крmax})$
2	$g_e = \frac{3,6 \cdot G_T \cdot 10^3}{N_{\text{еэ}} \cdot \xi_{\bar{N}}^*} \rightarrow \min,$ $z / (\kappa \text{Вм} \cdot \text{ч})$	М 2.1. $\xi_{\bar{M}}^* = 0,458 \cdot K_M \cdot v_{MC} - 0,233$ М 2.2. $\xi_{\bar{N}}^* = -0,964 + 1,80 \cdot K_M - 0,40^2 \cdot K_M^2 + \frac{0,023}{v_{MC}}$	$\xi_{\bar{M}}^* \leq K_M / (1 + 3v_{MC})$ $1,15 \leq K_M \leq 1,50$ $\frac{N_{\text{еmax}}}{N_{\text{еэ}}} \leq 1,17$

1	2	3	4
3	$W = \frac{\xi_{\overline{N}} \cdot N_{e3}}{K_0 \cdot E_K} \rightarrow \max, \text{М}^2/\text{с}$ $E_K = M_K / \eta_m$ $E_{\Pi} = E_K \cdot K_0 \rightarrow \min,$ $\text{кДж}/\text{М}^2$	$M\ 3.1. \vartheta^* = \frac{g \cdot \varphi_{кр} \cdot V_H}{\eta_m \cdot \xi_{\overline{N}}}, \text{Вм}/\text{кг}$ $M\ 3.2. m_{y\vartheta}^* = \eta_m \cdot \xi_{\overline{N}}^* / g \cdot \varphi_{кр} \cdot$ $V_H \cdot 10^{-3}, \text{кг}/\text{кВм}$	$\vartheta_{\min} \leq \vartheta^* \leq \vartheta_{\max}$ $m_{y\vartheta \min} \leq m_{y\vartheta}^* \leq m_{y\vartheta \max}$
4	$K_{E\Pi} = \frac{M_K^2}{\eta_m \cdot V} \rightarrow \min, \text{с}/\text{М}$	$M\ 4.1. m_3^* = N_{e3} / \vartheta^*, \text{т}$ $M\ 4.2. N_{e3}^* = \vartheta^* \cdot m_{3\max}, \text{кВм}$ $M\ 4.3. W_{\max}^* = \xi_{\overline{N}}^* \cdot N_{e3}^* / K_0 \cdot E_K,$ $\text{М}^2/\text{с}$	$m_{3\min} \leq m_3^* \leq m_{3\max}$ $N_{e3}^* \leq N_{e3}$ $W_{\max} \geq W^*$
5	$K_{m3} = V / \eta_m \cdot \xi_{\overline{N}}^* \cdot \vartheta \rightarrow$ $\min, \text{с}^2/\text{М}$	$M\ 5.1. y_{n.cm} = \frac{G_{30} \cdot a_u + G_{51}^* (a_n + L) - G_{52}^* \cdot a_k}{L},$ $\text{кН}$ $M\ 5.2. y_{k.cm} = \frac{G_{30} (L \cdot a_u) + G_{52}^* (L + a_k) - G_{51}^* \cdot a_n}{L},$ $\text{кН}$	$y_{n.cm} = 0,55(0,65)m_3^* \cdot g$ $m_{61}^* \leq m_{61\max}$ $y_{k.ct} = 0,45(0,35)m_3^* \cdot g$ $m_{62}^* \leq m_{62\max}$
6	$C_3 = \frac{K^I}{\Pi} \left[ \frac{y_{mp}(K_a + K_{T0})}{T_r} + 3\Pi + \right.$ $G_{mp} \cdot \kappa \cdot \tau \cdot (u_m + g \cdot u_m) \left. \right] \rightarrow$ $\min, \text{р}/\text{га}$ $\Pi = 0,36 \cdot \tau \cdot W \rightarrow \max,$ $\text{га}/\text{ч}$	$M\ 6.1. m_3^* = \frac{\xi_{\overline{N}}^* \cdot N_{e3} \cdot \eta_{mp} (1 - \delta_H^*)}{V_H^* \cdot g (\varphi_{кр}^* + f)}, \text{т}$ $M\ 6.2. i_K^* = \frac{m_3^* \cdot g (a \cdot f + \delta_H^* (b + f))}{\xi_{\overline{N}}^* \cdot \eta_{mp} (u_H + l)}, \text{М}^{-1}$ $M\ 6.3. V_H^* = \frac{(\xi_{\overline{N}}^* \cdot N_{e3})^* \cdot \eta_{тн}}{g \cdot \varphi_{кр} \cdot m_3}, \text{м}/\text{с}$	$m_{3\min} \leq m_3^* \leq m_{3\max}$ $V_{opt}^* < V_H^* \leq V_{\max}^*$

На втором этапе решением моделей М 2.1 и М 2.2 определяются оптимальные значения коэффициентов нагрузки  $\xi_{\overline{M}}^* = M_K^*/M_H$  и использования мощности  $\xi_{\overline{N}}^* = N_e^*/N_{e3}$  двигателя при обосновании совместных с механической трансмиссией режимов его работы в условиях вероятностной нагрузки. Критерий оптимальности  $g_{emin}$  определяется из условия  $dg_e/dM_K = 0$ . При известных  $K_M$  и  $v_{MC} \approx v_{K0}$  экстремальные значения  $\xi_{\overline{M}}^*$  и  $\xi_{\overline{N}}^*$  учитывают установленные ограничения.

Третий этап связан с оптимизацией показателей технологичности трактора для выполнения определенной группы родственных операций. Математические модели М 3.1 и М 3.2 представляют общие для всех типов энергомашин уравнения взаимосвязи указанных показателей с основными параметрами-адаптерами, установленными на предыдущих этапах первого и второго уровней общей системы оптимизации.

Максимум чистой производительности  $W_{\max}$  и минимум удельных энергозатрат  $E_{n\min}$  используются в качестве компромиссных критериев оптимальности. Ограничениями являются пределы регулирования показателей технологичности.

На четвертом этапе решением моделей 4.1–4.3 определяются оптимальные массоэнергетические параметры трактора с установленными показателями технологичности  $(\xi_{\overline{N}} \vartheta)_i^*$  и  $m_{y\vartheta i}^*$  для выполнения конкретной группы родственных операций с номинальной рабочей скоростью на длине гона  $l_{zi}$ . Основным критерием оптимальности является минимум эквиваленты энергозатрат на единицу производительности

$$K_{E\Pi} = K_E \cdot P_{кр} \cdot 10^{-3} = [1 + \Delta K (V_H^2 - V_0^2)]^2 / \eta_T \cdot V_H = \mu_K^2 / \eta_T \cdot V_H \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $K_E = E_K^2 / (\xi_{\overline{N}} \cdot N_{e3}) = \mu_K^2 / (\xi_{\overline{N}} \cdot N_{e3} \cdot \eta_T^2)$  – показатель удельных энергозатрат на единицу производительности.

Оптимальное значение эксплуатационной массы должно соответствовать условию  $m_{эmin} \leq m_{эi}^* \leq m_{эmax}$ . Однако для современных высокомоощных колёсных тракторов это условие на операциях первой группы (отвальная вспашка и глубокое рыхление) не выполняется, поскольку  $m_{эi}^* \geq m_{эmax}$ . Поэтому на родственных операциях с пониженной скоростью  $V_{Hi}$  двигатель необходимо переводить на частичную нагрузочную характеристику (регулирование цикловой подачи топлива) для получения мощности

$$N_{эi} = \eta_i^* \cdot m_{эmax} < N_{ээ} . \quad (2)$$

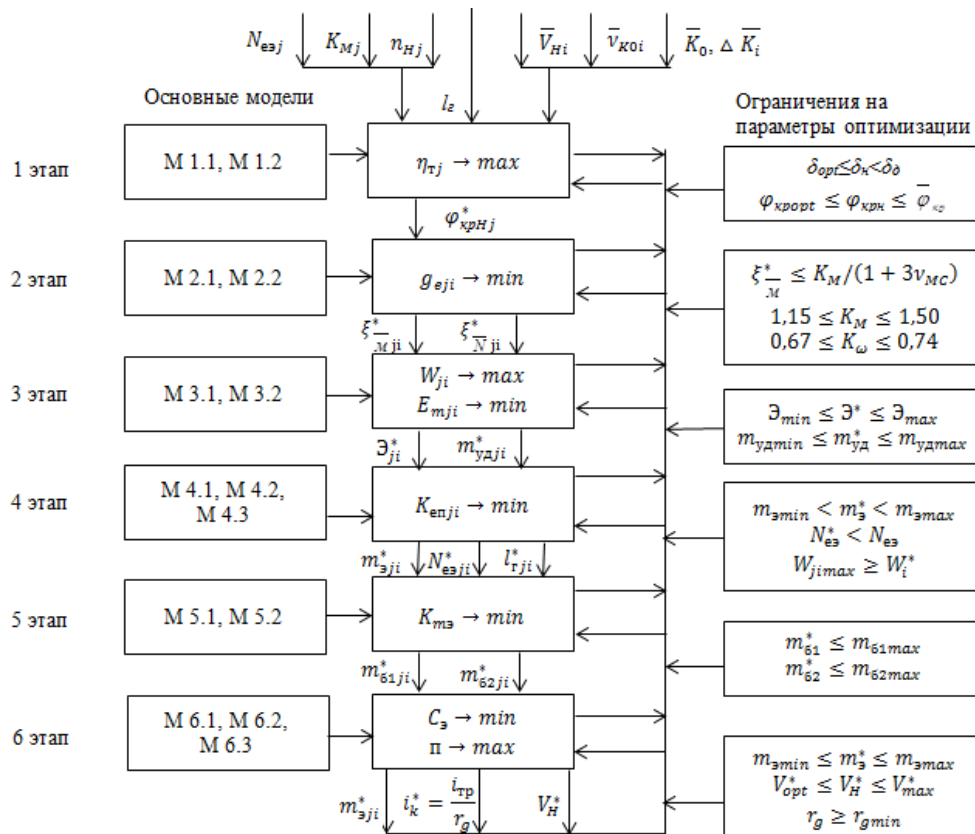


Рис. 1. Структурная схема адаптации эксплуатационных параметров колесного 4К46 трактора к зональным технологиям почвообработки

Оптимальная длина гона для указанной операционной технологии почвообработки определяются при этом из условия

$$W_i = \xi_{Ni}^* \cdot N_{ээi}^* \cdot \eta_{ТН}^* / K_{oi} \cdot \mu_{ki} \geq W_i^* . \quad (3)$$

Пятый этап предполагает обоснование оптимальных значений массы переднего  $m_{Б1i}^*$  и заднего  $m_{Б2i}^*$  балластов для данной группы родственных операций. Реакция почвы на передние  $Y_{п.ст}$  и задние  $Y_{к.ст}$  колеса неподвижного трактора, свободного от тяговой нагрузки ( $P_{кр} = 0$ ), в этом случае характеризуется статическими значениями

$$\begin{cases} Y_{п.ст} = m_{\delta}^* \cdot g \cdot a_{ц} / L; \\ Y_{к.ст} = m_{\delta}^* \cdot g (L - a_{ц}) / L, \end{cases} \quad (4)$$

где  $a_{ц}$  – расстояние от центра масс до оси задних колес;  $L$  – продольная база трактора.

Нагруженность колес оценивают по коэффициентам нагрузки передних  $\lambda_{\text{п}} = Y_{\text{п.ст}} / (m_{\text{э}}^* \cdot g)$  и задних  $\lambda_{\text{к}} = Y_{\text{к.ст}} / (m_{\text{э}}^* \cdot g)$  колес, отношение которых для тракторов 4К46, агрегируемых с прицепными машинами, должно составлять  $\lambda_{\text{п}} / \lambda_{\text{к}} = 0,55/0,45$ , а с навесными орудиями –  $0,65/0,35$  [3]. Под действием тяговой нагрузки при  $P_{\text{крп}} = \varphi_{\text{крп}} \cdot m_{\text{э}}^* \cdot g$  реакции по осям выравниваются, что соответствует наилучшему использованию сцепного веса трактора.

Для трактора с минимальным эксплуатационным весом  $G_{\text{эо}} = m_{\text{эо}} \cdot \varphi_{\text{крп}} \cdot g$  и установленными значениями  $L$  и  $a_{\text{ц}}$  оптимальные значения массы переднего и заднего балластов определяются решением моделей 5.1 и 5.2, представляющих уравнения моментов относительно осей передних ( $O_1$ ) и задних ( $O_2$ ) колес (рис. 2)

$$\begin{cases} Y_{\text{п.ст}} = \frac{G_{\text{Б1}}(L+a_{\text{п}})+G_{\text{эо}} \cdot a_{\text{ц}}-G_{\text{Б2}} \cdot a_{\text{к}}}{L}; \\ Y_{\text{к.ст}} = \frac{G_{\text{эо}}(L-a_{\text{п}})+G_{\text{Б2}}(L+a_{\text{к}})-G_{\text{Б1}} \cdot a_{\text{п}}}{L}, \end{cases} \quad (5)$$

где  $a_{\text{п}}$  и  $a_{\text{к}}$  – продольные ординаты центра масс переднего и заднего балласта.

Учитывая, что  $m_{\text{эi}}^* = m_{\text{оэ}}^* + m_{\text{Б1}}^* + m_{\text{Б2}}^*$ , решение уравнений (5) дает

$$\begin{cases} m_{\text{Б1i}}^* = \frac{(m_{\text{эi}}^* - m_{\text{оэ}}^*)(a_{\text{к}} + a_{\text{ц}})}{(L + a_{\text{п}} + a_{\text{к}})}, \\ m_{\text{Б2i}}^* = \frac{(m_{\text{эi}}^* - m_{\text{оэ}}^*)(L - a_{\text{п}} + a_{\text{к}})}{(L + a_{\text{п}} + a_{\text{к}})}, \end{cases} \quad (6)$$

а соотношение  $\lambda_{\text{Би}}^* = m_{\text{Б1i}}^* / m_{\text{Б2i}}^*$  выразится как

$$\lambda_{\text{Би}}^* = \frac{a_{\text{ц}} + a_{\text{к}}}{(L + a_{\text{п}} - a_{\text{ц}})}. \quad (7)$$

Критерий оптимальности на этом этапе представляет эквивалента эксплуатационной массы  $K_{\text{мэ}}$  при установленных ограничениях массы балластных грузов.

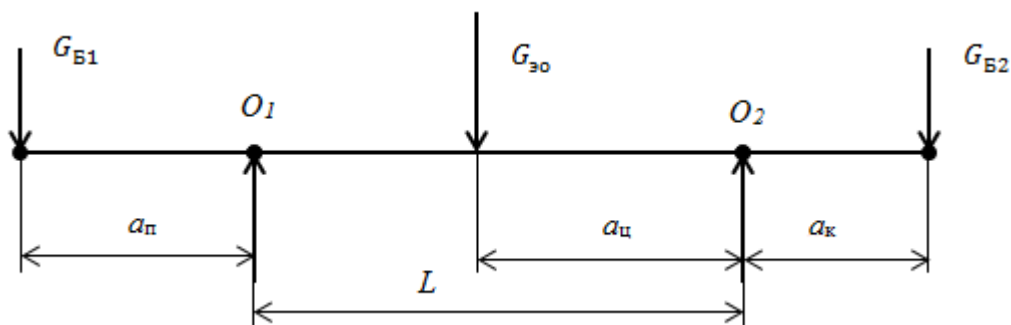


Рис. 2. Расчетная схема определения эксплуатационной массы трактора 4К46 при балластировании

На заключительном шестом этапе решением моделей 6.1–6.3 (см. табл.) определяются наиболее рациональные массоэнергетические параметры и передаточные числа  $i_{\text{тр}}/r_g$  трансмиссии трактора для обобщенных условий отдельных или нескольких групп родственных технологических операций с учетом приведенных ограничений по эксплуатационной массе и номинальной скорости рабочего хода. Удельные эксплуатационные затраты  $C_{\text{э}}$  и техническая производительность  $\Pi$  представляют критерии оптимальности.

Технический уровень и эффективность трактора оцениваются на заключительном этапе адаптации с использованием комплексного критерия [4]

$$K_{\Sigma} = K_{\Pi} \cdot K_N \cdot K_m \cdot K_E, \quad (8)$$

представляющего произведение частных критериев эффективности:  $K_{\Pi}$  – по производительности;  $K_N$  – по часовому расходу топлива (эквивалента  $N_e$ );  $K_m$  – по эксплуатационной массе;  $K_E$  – по расходу топлива на единицу площади (эквивалента  $E_{\text{пр}} = E_{\Pi}/W$ ), которые рассчитываются по формулам:

$$\begin{cases} K_{\Pi} = 1 - (|W - W^*|)/W^*; \\ K_N = 1 - (\xi_N N_{e3} - (\xi_N N_{e3})^*)/(\xi_N N_{e3})^*; \\ K_m = 1 - (m_3 - m_3^*)/m_3^*; \\ K_E = 1 - (E_{\text{пр}} - E_{\text{пр}}^*)/E_{\text{пр}}^*. \end{cases} \quad (9)$$

В уравнении (9) показатели без (\*) берут для конкретного трактора 4К46, а со знаком (\*) для базового варианта при  $E_{\text{пр}min}^*$ .

### Выводы

1. Предложена структурная схема системной адаптации колесных 4К46 тракторов к совокупности используемых технологических операций основной обработки почвы, позволяющая определить (с учетом возможностей балластирования и регулирования мощности двигателя) число их типоразмеров для превалярующего класса длины гона в агротехнической зоне эксплуатации.

2. Разработанные на основе детерминированно-стохастических связей с использованием обоснованных параметров – адаптеров, критериев эффективности и ограничений – математические модели и алгоритм расчета максимально учитывают и с достаточно высокой точностью отражают влияние природно-производственных факторов на режим рабочего хода и эксплуатационные параметры колесного трактора высокой мощности.

3. Комплексный критерий эффективности может служить базовым для оценки технологического уровня высокомоментных тракторов с учетом адаптации к условиям эксплуатации.

### Литература

1. Селиванов Н.И. Система адаптации эксплуатационных параметров тракторов для основной обработки почвы // Вестник КрасГАУ. – 2010. – № 7. – С. 127–133.
2. Селиванов Н.И. Эксплуатационные параметры колесных тракторов высокой мощности // Вестник КрасГАУ. – 2014. – № 3. – С. 136–142.
3. Селиванов Н.И. Эксплуатационные свойства сельскохозяйственных тракторов: учеб. пособие / Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2010. – 347 с.
4. Самсонов В.А. Расчет показателей трактора с учетом влияния природно-производственных факторов // Тракторы и с.-х. машины. – 2007. – № 4. – С. 21–25.

