

Министерство сельского хозяйства российской федерации
ФБГОУ ВПО Красноярский государственный аграрный университет

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МТА

Учебное пособие

Красноярск 2014

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
ФБГОУ ВПО «Красноярский государственный аграрный университет»

С.Ю. Журавлев

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МТА

Рекомендовано научно-методическим советом федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Красноярский государственный аграрный университет» для внутривузовского использования в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по направлению подготовки 110800.62 «Агроинженерия»

Красноярск 2015

ББК 40:72я73

Ж 91

Рецензенты:

*В.А. Терсков, д-р техн. наук, проф. кафедры математики
и информатики Красноярского института железнодорожного
транспорта (филиал ИрГУПС)*

Н.В. Петровский, канд. техн. наук, директор ГНУ КНИИСХ

Россельхозакадемии

Ж 91

Журавлев, С.Ю. Оценка эффективности использования МТА: учеб. пособие / С.Ю. Журавлев; Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2015. – 88 с.

Дано описание методики расчёта энергетических показателей МТА в условиях воздействия вероятностной нагрузки, а также представлена методика определения оптимальных параметров и режимов работы МТА.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению 110800.62 «Агроинженерия», профили «Технологическое оборудование для хранения и переработки сельскохозяйственных продуктов», «Технические системы в агробизнесе», «Технический сервис в агропромышленном комплексе».

ББК 40:72я73

© Журавлев С.Ю., 2015

© ФГБОУ ВПО «Красноярский государственный
аграрный университет», 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МТА.....	5
1.1. Описание задачи.....	5
1.2. Оценка средних значений основных энергетических показателей МТА по параметрическим моделям.....	36
2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА СРЕДНИХ ЗНАЧЕНИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ И ОПТИМАЛЬНЫХ НАГРУЗОЧНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ МТА.....	40
2.1. Определение средних значений энергетических показателей работы МТА.....	40
2.2. Определение оптимальных нагрузочных режимов работы МТА.....	41
3. МЕТОДИКА МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГОЗАТРАТ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МАШИННО-ТРАКТОРНЫХ АГРЕГАТОВ.....	43
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	79
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	80
ЛИТЕРАТУРА.....	81
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	82

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ещё более актуальными стали такие требования к трактору, как максимум производительности и минимум удельных затрат.

В условиях эксплуатации тракторы, входящие в состав машинно-тракторного агрегата (МТА), подвергаются непрерывно изменяющимся внешним воздействиям. В результате значительно ухудшаются эксплуатационные показатели работы агрегата. Поэтому проблема повышения эффективности функционирования МТА при выполнении технологических операций путем оптимизации параметров и режимов работы МТА имеет большое значение.

Существуют экспериментальные и теоретические методы оценки эффективности функционирования МТА. Более предпочтительны теоретические методы, не требующие больших затрат времени и денежных средств, позволяющие широко использовать ЭВМ и программы, разработанные на основе математической модели оценки влияния переменных внешних воздействий.

Целью данной работы является ознакомление с методикой оценки работы МТА в условиях переменной внешней нагрузки, а также с методикой определения оптимальных режимов работы МТА. При этом используются результаты научных исследований, лежащих в основе представленных теоретических методик. Далее, на основе представленных методик, необходимо выполнить расчетно-графическую работу в соответствии с полученным вариантом.

Время выполнения задания – 16 часов.

Отчёт о проделанной работе выполняется в виде отдельной расчетно-графической записки.

Цель работы:

1. Изучить методику оценки влияния переменных внешних факторов на показатели работы машинно-тракторного агрегата.
2. Изучить методику определения оптимальных параметров и режимов работы МТА.

В работе должны содержаться следующие пункты:

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Отчет о выполнении заданий разделов 1, 2 и 3 с оформлением графической части работы

1. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МТА

1.1. Описание задачи

Сельскохозяйственный машинно-тракторный агрегат в процессе выполнения технологических операций по возделыванию продукции растениеводства испытывает негативное воздействие переменных внешних факторов.

Непрерывный и вероятностный характер внешних воздействий, порождаемый неоднородностью физико-механических свойств почвы, а так же изменением технологического процесса и другими факторами, обуславливает колебания нагрузочного и скоростного режимов работы МТА при выполнении технологических операций. Колебания эксплуатационных режимов работы агрегатов приводят к ухудшению их энергетических, технико-экономических и агротехнических показателей.

Результатом данного процесса является снижение производительности МТА, повышение эксплуатационных затрат, увеличение агротехнических сроков выполнения технологических операций и, как следствие, увеличение потерь урожая сельскохозяйственных культур.

Кроме того, значительно увеличиваются многие составляющие энерготехнологического баланса продукции растениеводства.

Вопросы оценки влияния вероятностных внешних воздействий на показатели работы МТА, а также проблема разработки методов вероятностно-статистической оценки эксплуатационных режимов работы сельскохозяйственных агрегатов исследованы в многочисленных работах отечественных ученых.

Приоритет в изучении проблемы влияния неустановившегося характера внешней нагрузки на двигатель трактора принадлежит академику В.Н. Болтинскому. В его исследованиях на основании теории приближенных вычислений предложено уравнение кривой момента сопротивления, представляющее собой периодическую функцию типа синусоиды с определенными значениями периода и амплитуды.

$$M_c(t) = \bar{M}_c + A_M \sin mt = \bar{M} \left(1 + \frac{\delta_M}{2} \sin mt\right), \quad (1)$$

где $A_M = 0,5(M_{\max} - M_{\min}) = 0,5\delta_M \bar{M}_c$ – амплитудные колебания момента сопротивления на валу двигателя;

$\bar{M}_c = 0,5(M_{\max} + M_{\min})$ – среднее значение момента сопротивления на валу двигателя;

$m = 2\pi/T$ – частота колебаний;

T – период колебаний M_c на валу двигателя;

$$\delta_M = \frac{2A_M}{M_c} \text{ – степень неравномерности } M_c;$$

M_{\max}, M_{\min} – максимальное и минимальное значение момента сопротивления на валу двигателя.

В.Н. Болтинским в результате исследований были установлены значительные изменения показателей работы двигателя при воздействии на него колебаний внешнего момента сопротивления. Так, при работе на регуляторе со степенью неравномерности внешнего момента сопротивления $\delta_M = 0,3$ эффективная мощность снижается на 23%, а расход топлива увеличивается на 25%.

Кроме того, В.Н. Болтинским было установлено, что на показатели работы двигателя оказывают влияние низкочастотные колебания нагрузки с периодом $T > 1...2$ с; высокочастотные колебания внешней нагрузки с периодом $T \leq 1...2$ с практически не оказывают влияния на энергетику МТА, так как преодолеваются инерцией масс агрегата.

В.Н. Болтинский отмечает, что причиной ухудшения показателей работы двигателя является нарушение рабочего процесса двигателя в результате воздействия на него вероятностной нагрузки. Снижается коэффициент наполнения, коэффициент избытка воздуха, а так же индикаторный и механический КПД. Колебания угловой скорости коленчатого вала вызывают серьезные нарушения в работе системы регулирования, которые заключаются в фазовых сдвигах между входными и выходными координатами системы (момент сопротивления, угловая скорость коленчатого вала, положение рейки насоса, крутящий момент двигателя).

В других исследованиях установлено, что изменение энергетических показателей наблюдается при отсутствии фазовых сдвигов между входными и выходными координатами системы.

Авторы этих работ отмечают, что им не удалось получить снижения показателей работы двигателя на линейном участке регуляторной характеристики. Колебания внешней нагрузки вызывают колебания показателей двигателя, однако их средние значения сохранились такими же, как и при нагрузке с постоянным моментом сопротивления. В то же время работа двигателя при переходе рабочей точки с корректорного участка характеристики на регуляторный и обратно сопровождается значительным ухудшением показателей работы двигателя. Это объясняется нелинейностью регуляторной характеристики двигателя.

Метод гармонического анализа применяется в работах И.И. Кисилева, А.Б. Лурье, Ю.К. Киртбая, Н.С. Ждановского, В.А. Гусятникова и Г.М. Кутькова, А.В. Николаенко и других ученых.

Дальнейшее развитие метод академика В.Н. Болтинского по определению влияния колебательного характера нагрузки на работу МТА получил в трудах профессора Ю.К. Киртбая. Ю.К. Киртбая пришел к выводу, что тяговые процессы можно считать периодической функцией пути или времени. К такому же выводу пришли и другие ученые. В своих работах они отмечают, что на энергетику трактора наибольшее влияние оказывают макроколебания с областью частот от 0 до 0,2 Гц.

Ю.К. Киртбая предложил описать закон изменения внешних воздействий на МТА с помощью выражения, представленного в виде тригонометрического бинома [6]:

$$R_M = R_{cp} + \Delta R' \cos(2\pi\Delta T/T) + \Delta R'' \cos(2\pi T\Delta T/t^2), \quad (2)$$

где R_{cp} – среднее значение тягового сопротивления;

$\Delta R', T$ – соответственно амплитуда и период низкочастотной составляющей процесса колебаний;

$\Delta R'', t$ – соответственно амплитуда и период высокочастотной составляющей процесса колебаний;

ΔT – интервал времени, кратный периоду колебаний T .

Для описания закона, по которому колеблется внешняя нагрузка, используется разложение периодической функции в бесконечный ряд Фурье:

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos \omega_0 t + B_n \sin n\omega_0 t), \quad (3)$$

где $f(t)$ – периодическая функция, удовлетворяющая условиям Дирихле;

A_0 – среднее значение величины;

n – порядок высшей гармоники;

A_n, B_n – коэффициент Фурье;

T_0 – период основной гармоники;

$\omega = 2\pi/T_0$ – круговая частота основной гармоники.

Коэффициенты A_0, A_n, B_n определяются по формулам Эйлера:

$$A_0 = T_0^{-1} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} f(t) dt,$$

$$A_n = 2T_0^{-1} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} f(t) \cos n \omega_0 t dt,$$

$$B_n = 2T_0^{-1} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} f(t) \sin n \omega_0 t dt.$$

В работах профессора А.Б. Лурье отмечается необходимость в определении динамических характеристик МТА. В результате воздействия входных переменных в процессе работы МТА вероятностные характеристики выходных его показателей устанавливаются по известным характеристикам входного воздействия, а также по таким динамическим характеристикам агрегата, как передаточная функция $W(S)$ и ее амплитудно-частотная характеристика $W(i\omega)$.

В реальных условиях работы МТА внешняя нагрузка изменяется непрерывно и процесс колебаний нагрузки имеет случайный характер (в вероятностно-статистическом смысле). Причем закон эмпирического распределения низкочастотных составляющих внешних воздействий близок к нормальному закону распределения случайных величин. Поэтому для оценки влияния переменных внешних факторов на выходные параметры мобильного машинно-тракторного агрегата предпочтительно использовать вероятностно-статистический метод с применением детерминированных функций законов распределения и количественных характеристик входных переменных воздействий. Данный метод (метод функций случайных аргументов) широко использован в работах С.А. Иофинова и Л.Е. Агеева, В.Ф. Скробача, В.С. Красовских, А.П. Савельева, Р.Х. Юсупова и многих других авторов.

В работах вышеуказанных ученых подробно рассмотрены вопросы оценки показателей работы МТА при помощи аналитических зависимостей по детерминированным характеристикам двигателя.

Сущность метода состоит в том, что МТА рассматривается как модель типа «вход-выход». Входные X_i и выходные Y_i переменные взаимосвязаны, данная взаимосвязь определяется с помощью детерминированной функциональной зависимости $Y_i = f(X_i)$ при известном законе распределения $Y(x_i)$. Функции $Y_i = f(X_i)$ устанавливаются при аппроксимации стендовой характеристики дизеля.

Л.Е. Агеев в своих работах [1, 2] показывает, что основные энергетические показатели работы двигателя (частота вращения вала двигателя n_d , эффективная мощность N_e , часовой расход топлива G_T , удельный расход топлива q_e), а также показатели работы трактора (V_p – рабочая скорость движения МТА, км/ч; $N_{кр}$ – тяговая мощность, кВт; G_T – часовой расход топлива, кг/ч; $g_{кр}$ – удельный тяговый расход топлива, г/(кВт·ч) под влиянием переменной нагрузки (колебания крутящего момента M_k на валу двигателя или колебания силы тяги на крюке трактора $P_{кр}$) отклоняются от своих значений, полученных при статическом характере нагрузки. Это отклонение зависит от величины нагрузки λ_M и коэффициента вариации ν_M . Чем больше ν_M , тем больше отклонение фактического значения того или иного параметра МТА от исходного. Наибольшее отклонение математических ожиданий показателей работы дизеля от значений по типовым стендовым характеристикам наблюдается в области номинального нагрузочного режима.

В дальнейшем метод функций случайных аргументов был усовершенствован в исследованиях Л.И. Минделя, А.Б. Ризоева, Н.И. Джабборова, С.В. Глотова, А.К. Бурма, В.А. Эвиева и других авторов.

В данных работах представлены математические модели для определения вероятностно-статических оценок агрегатов, в состав которых входят тракторы с газотурбинными двигателями, двигателями

постоянной мощности, тракторы с гидромеханической трансмиссией и т.д.

Математические модели работы МТА в условиях переменного характера внешних воздействий, разработанные на основе метода функций случайных аргументов, позволяют с высокой точностью описывать влияние переменной нагрузки на энергетику МТА. Это подтверждается многочисленными исследованиями.

В последние десятилетия все большее применение получают тракторы с гидромеханической трансмиссией и двигателем постоянной мощности. Современные автотракторные дизели имеют электронные системы регулировки подачи топлива и бортовые компьютеры, которые, кроме всего прочего, могут достаточно эффективно отслеживать оптимальные режимы работы МТА в условиях воздействия переменной внешней нагрузки. При этом дизели с классической регуляторной характеристикой также широко используются в конструкции современных тракторов. В связи с вышесказанным дальнейшие исследования в области влияния переменных внешних факторов на работу агрегатов актуальны и имеют большой научный и практический интерес.

Методы оптимизации параметров и режимов работы МТА

При определении оптимальных параметров и режимов работы МТА первостепенное значение придается правильности выбора критерия или критериев оптимизации для многокритериальной задачи. При расчете оптимальных эксплуатационных режимов используются следующие группы критериев.

При оптимизации режимов работы МТА по технико-экономическим показателям используются обобщенные технико-экономические критерии:

- максимум производительности МТА;
- минимум удельных затрат труда на 1 га;
- минимум удельного расхода топлива на 1 га;
- минимум удельных денежных затрат на 1 га.

При оптимизации эксплуатационных режимов работы агрегатов по энергетическим показателям двигателя применяются критерии:

- максимум эффективной мощности;
- максимум часового расхода топлива;
- минимум удельного расхода топлива.

Минимум удельного расхода топлива является компромиссным критерием по сравнению с максимумом мощности и максимумом часового расхода топлива.

Критерии при оптимизации режимов работы агрегата по тяговым и топливно-экономическим показателям трактора таковы:

- максимум тяговой мощности;
- максимум часового расхода топлива;
- минимум удельного расхода топлива;
- максимум условного КПД трактора и др.

В последнее время большое внимание в научных исследованиях уделяется энергетическому критерию (суммарные энергетические затраты) оценки эффективности работы МТА. По мнению многих исследователей энергетический критерий наиболее приемлем в качестве показателя оптимальности использования сельскохозяйственных агрегатов по сравнению с такими распространенными и достаточно универсальными критериями

оптимизации, как суммарные эксплуатационные затраты и приведенные затраты на единицу выполняемой работы.

При оценке эксплуатационных свойств мобильных СХА большое значение имеют энергетические показатели. Основные энергетические показатели:

- эффективная мощность двигателя N_e ,
- частота вращения коленчатого вала n_g ,
- массовый расход топлива G_m ,
- удельный эффективный расход топлива g_e .

Классические методы определения оптимальных параметров и режимов работы агрегата основаны на нахождении экстремума вероятностных оценок его выходных величин. Экстремумы вероятностных оценок характеризуют меру рассеяния случайной величины.

Ю.К. Киртбая предложил при определении оптимальной степени нагрузки двигателя по максимуму производительности и соответствующей топливной экономичности агрегата использовать выражение

$$\xi q_{opt} = K_q / (1 + 0,5\delta_K), \quad (4)$$

где K_q – коэффициент допустимой перезагрузки двигателя из условия безостановочной работы;

δ_K – степень неравномерности тягового сопротивления агрегата.

С.А. Иофинов предлагает при нахождении оптимальной степени загрузки двигателя из условия максимальной производительности агрегата использовать формулу

$$\xi M_{opt}(v) = \left\{ \frac{\left[1 + (K_q^2 + K_q) \frac{n_H}{n_X} + (2K_q^2 - K_q - 1) \frac{n_{min}}{n_X} \right]^{\frac{1}{2}}}{[3(2 - (1 - \delta/2))^2]} \right\}, \quad (5)$$

где K_q – коэффициент приспособляемости;

n_H, n_X, n_{min} – частота вращения вала двигателя: номинальная, холостого хода, минимальная, мин⁻¹;

δ – степень неравномерности крутящего момента.

Л.Е. Агеев при оценке уровня использования агрегатов рассматривает обобщенный индекс использования энергетических параметров МТА, который вычисляется по формуле [1]

$$\lambda_0^* = (\lambda_{\bar{n}\delta}^* \lambda_{\bar{N}_e}^* \lambda_{\bar{G}T}^* \lambda_{\bar{q}_e}^*)^{\frac{1}{4}}, \quad (6)$$

где $\lambda_{\bar{n}\delta}^*, \lambda_{\bar{N}_e}^*, \lambda_{\bar{G}T}^*, \lambda_{\bar{q}_e}^*$ – частные индексы, отвечающие стационарным экстремальным значениям математических ожиданий энергетических параметров: частота вращения вала двигателя, эффективная мощность, расход топлива. Частные индексы вычисляются по формуле

$$\lambda_i^* = M^*(y)/Y_H \quad \text{или} \quad \lambda_i^{*-1} = \frac{Y_H}{M^*(y)}, \quad (7)$$

где $M^*(y)$ – экстремальное значение выходного параметра работы МТА;

Y_H – номинальное значение энергетического показателя работы двигателя.

Экстремальные (оптимальные) значения энергетических параметров МТА $M^*(y)$ Л.Е. Агеев предлагает находить по следующей методике [1]:

- производится дифференцирование функции для расчета математических ожиданий $M^*(y)$ по аргументу M_K ;

- с помощью классического метода анализа функции $M(y) = f(\bar{M}_K)$ при $dM(y)/dM_K = 0$ рассчитываются экстремальные значения момента M_K и аргумента $t_H^* = (\bar{M}_K^* - M_H) / \sigma_M^*$, где M_H – номинальный момент на валу двигателя, σ_M^* – стандарт момента \bar{M}_K^* ;

- определяются экстремальные значения $M^*(y)$ параметров МТА по известным значениям \bar{M}_K^* и t_H^* .

При определении оптимальных режимов работы МТА в качестве критериев оптимизации рассматриваются максимум часового расхода топлива $\bar{G}_{T \max}$, максимум эффективной мощности $\bar{N}_{e \max}$ и др. [1].

Определяя оптимальные нагрузочные режимы при $\bar{G}_{T \max}$, исследуем на экстремум функцию $\bar{G}_T = f(M_K)$. При $d\bar{G}_T / d\bar{M}_K = 0$ получаем

$$\Phi(t_H^*) = 0,5bb_1^{-1}, \quad (8)$$

$$\text{где } t_H^* = \frac{M_H - \bar{M}_K^*}{\sigma_M}; \quad \Phi(t_H^*) = (2\pi)^{-1/2} \int_0^{t_H^*} e^{-t^2/2} dt.$$

Экстремальную степень использования крутящего момента находим по формуле

$$\lambda_{\bar{M}}^* = 1 - M_H^{-1} t_H^* \sigma_M, \quad (9)$$

где M_H – номинальное значение крутящего момента.

Значение коэффициента $\lambda_{\bar{M}}^*$ при вероятностной нагрузке по $\bar{N}_{e \max}$ находим, исследуя на экстремум функцию $\bar{N}_e = f(M_K)$. При $d\bar{N}_e / d\bar{M}_K = 0$ получаем

$$y_1(t_H) - y_2(t_H) = 0, \quad (10)$$

где $y_1(t_H) = 0,5 a^* + b^* \bar{M}_K - b_1^* (2\bar{M}_K - M_H) \Phi(t_H)$;

$$y_2(t_H) = -2 b_1^* \varphi(t_H) \sigma_M;$$

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

$$\varphi(t_H) = (2\pi)^{-1/2} \exp(-0.5 t_H^2).$$

Решая уравнение (10) графически (рисунок 1.1), находим значение t_H^* и \bar{M}_K^* , так как $t_H^* = \frac{M_H - \bar{M}_K^*}{\sigma_M}$.

Экстремальная степень использования крутящего момента на валу дизеля $\lambda_{\bar{M}}^*$ и коэффициент $\lambda_{\bar{N}_e}^*$ вычисляются по формулам

$$\lambda_{\bar{M}}^* = 1 - M_H^{-1} t_H^* \sigma_M; \quad \lambda_{\bar{N}_e}^* = \bar{N}_e^* / N_{eH}, \quad (11)$$

где \bar{N}_e^* – математическое ожидание мощности при $\bar{M}_K = \bar{M}_K^*$,
 $t_H = t_H^*$.

В последнее время большое внимание в научных исследованиях уделяется энергетическому критерию (суммарные энергетические затраты) оценки эффективности работы МТА [6]. По мнению многих исследователей, энергетический критерий наиболее приемлем в качестве показателя оптимальности использования сельскохозяйственных агрегатов по сравнению с такими распространенными и достаточно универсальными критериями оптимизации, как суммарные эксплуатационные затраты и приведенные затраты на единицу выполняемой работы.

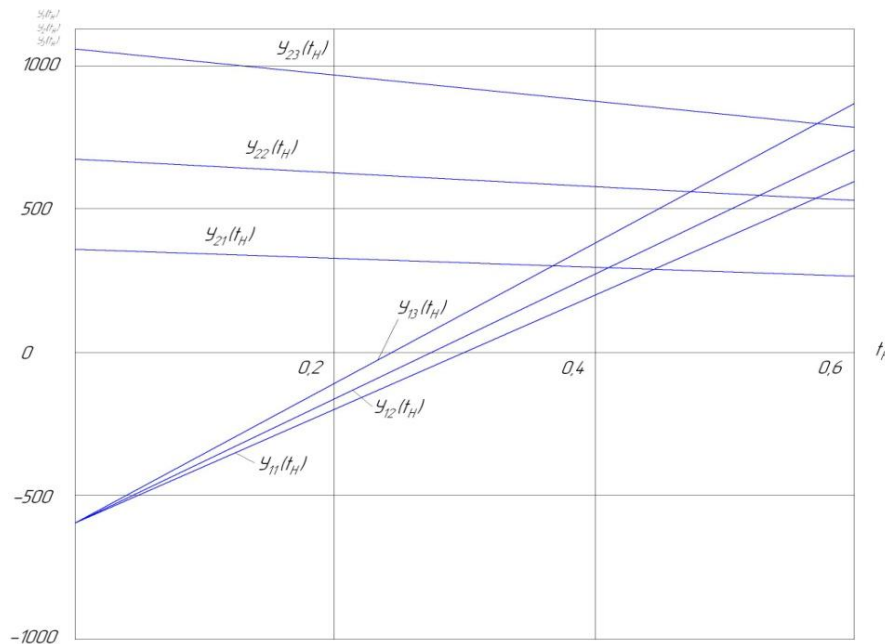


Рисунок 1.1 – Графическое определение аргумента t_H^*

по эффективной мощности: 1 – $v_M = 0,1$; 2 – $v_M = 0,2$; 3 – $v_M = 0,3$

Критерий «суммарные энергетические затраты» по своему содержанию соответствует основному направлению развития

машинно-технологической сферы АПК в области использования современных энергосберегающих технологий производства сельскохозяйственной продукции. Снижение энергопотребления может быть получено за счет повышения КПД МТА в результате использования оптимальных режимов их работы, снижения энергозатрат, энергоемкости и др.

В ряде работ представлены результаты поиска путей сбалансированности энергозатрат технологического процесса производства сельскохозяйственных культур.

Под сбалансированностью энергозатрат понимается максимальное равенство вложенной в производство энергии и энергетического содержания полученной продукции. Одним из направлений снижения вложенных в производство энергозатрат рассматривается оптимизация использования машинных комплексов по производству продукции. В качестве показателя эффективности по параметру энергоемкости используется энергетический КПД технологического комплекса по производству и переработке сельхозпродукции.

Оценка производственной деятельности по сбалансированности затраченной и полученной энергии [6] во многом позволяет более достоверно определить эффективность сельскохозяйственных технологий и уровень использования машин.

Преимущество критерия энергетических затрат по сравнению с эксплуатационными затратами обосновывается несколькими пунктами:

- независимость от последствий инфляции и рыночных колебаний;
- возможность оценки в определенных единицах (МДж);

- более эффективная оценка технологического и технического уровня в различных отраслях производственной деятельности;

- возможность оценки технологических процессов и машин не только по денежным затратам, но и с помощью таких параметров, как расход ГСМ, производительность, расход материалов и т.д.

Однако методика оптимизации энергетических затрат не учитывает особенности работы агрегатов при выполнении технологических операций, вероятностный характер нагрузки и воздействие ее колебаний на выходные энергетические показатели МТА.

Различные методики определения энергетических затрат технологического процесса обычно не учитывают такие закономерности работы МТА, как вероятностный характер внешних воздействий, колебания нагрузки, особенности динамики движения агрегата при выполнении технологических операций. В результате некоторых исследований установлено, что в реальных условиях фактические энергозатраты значительно превышают расчётные, при этом разница тем больше, чем больше размах колебаний входящих воздействий на МТА, поэтому энергетическую эффективность использования оптимальных параметров и режимов работы мобильных сельскохозяйственных агрегатов предлагается определять путем сопоставления энергетических затрат на производство продукции при базовом и рекомендуемом нагрузочном режимах [6]:

$$\mathcal{E}_Г = (E_{\text{Пб}} - \bar{E}_{\text{П}}^*) \cdot T_Г \cdot \bar{W}_ч^*, \quad (12)$$

где $\mathcal{E}_Г$ – годовой энергетический эффект от использования существующего (при работе на оптимальных режимах) или перспективного мобильного агрегата, МДж/га;

$E_{\text{III6}}, \bar{E}_{\text{III}}^*$ – соответственно базовое и оптимальное значения энергетических затрат технологического процесса, МДж/га;

T_r – нормативная годовая загрузка агрегата;

\bar{W}_q^* – оптимальное значение производительности МТА, га/ч.

*Структура энергетических затрат при использовании
машинно-тракторных агрегатов*

Сельскохозяйственное производство с момента зарождения человеческой цивилизации и по настоящее время остаётся одной из крупнейших отраслей по преобразованию солнечной и антропогенной энергии в энергию производства сельскохозяйственной продукции. Именно этот продукт человеческой деятельности и, конечно же, природы является одной из основ поддержания жизнедеятельности человека. В процессе эволюции человек всё в большем масштабе применял сначала примитивные, а в результате технического прогресса – все более сложные средства механизации для осуществления технологии производства продукции растениеводства. Использование всё более сложных машин и сопутствующих им средств сопровождения требует большого количества энергетических расходов, и, следовательно, энергетических вложений в производство пищевых средств жизнеобеспечения человека.

В настоящее время часть энергетического вложения в процессе производства сельскохозяйственной продукции, имеющая отношение к использованию машинных технологий, занимает весьма значительное место в общем количестве энергозатрат. Она является важнейшим источником экономии, вложенной в производство так называемой антропогенной (технической) энергии.

Человек до сих пор не разработал эффективных средств для максимального использования природной энергии и, тем более, для её рационального использования при регенерации сельскохозяйственных растений. Однако в настоящее время уровень технического прогресса позволяет разрабатывать и внедрять в производство методы и средства экономии антропогенной энергии, таким образом снижается, в конечном итоге, себестоимость продуктов питания.

Исходя из вышесказанного макроструктура энергозатрат на производство и дальнейшую переработку сельскохозяйственной продукции состоит из двух составляющих: естественные и антропогенные затраты. Нас интересует вторая составляющая.

Установлено, что в общей структуре энергозатрат прослеживается следующая макроструктура технологических звеньев: первое – расходы на изготовление машин, второе – ГСМ и электрическая энергия, расходы на удобрения и энергия живого труда.

Один из путей снижения энергозатрат по второй составляющей – использование современных технологий по минимальной и нулевой технологии обработки почвы и возделывания сельскохозяйственных культур. Использование данных технологий предполагает разработку соответствующей системы машин. Однако минимальные технологии не всегда приводят к увеличению продуктивности при снижении энергетических и материальных ресурсов. Применение этих технологий зачастую ограничивается природно-климатическими условиями отдельных сельскохозяйственных зон.

В целом необходимо отметить, что в настоящее время для увеличения урожайности уходит колоссальное количество невозобновляемой дополнительной энергии, а именно: 40...45%

дизельного топлива, 30...36% различных марок бензина, около 50% моторных масел по отношению к общему расходу ГСМ.

В ряде исследований также отмечается, что затраты дополнительной энергии, в основном на ГСМ, возрастают и становятся проблемой мирового значения в связи с предстоящим исчерпанием запасов сырья. Поэтому поиск путей снижения антропогенных энергозатрат является одним из самых перспективных направлений повышения эффективности сельскохозяйственного производства [6].

Энергетические затраты подразделяют на прямые и косвенные. Прямые затраты непосредственно связаны с выполнением технологических операций. Косвенные затраты энергии – это затраты на изготовление средств производства.

Эффективность использования МТА предлагается оценивать по минимуму критерия- суммарные энергетические затраты. Данный критерий имеет следующую структуру:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{и.тр.}} + \mathcal{E}_{\text{и.схм}} + \mathcal{E}_{\text{и.пр.}} + \mathcal{E}_{\text{р.то}} + \mathcal{E}_{\text{с.р.}} + \mathcal{E}_{\text{упр.}} + \mathcal{E}_{\text{ТСМ}} + \mathcal{E}_{\text{пот}} \rightarrow \min, \quad (13)$$

где \mathcal{E} – удельные суммарные энергетические затраты, МДж/га;

$\mathcal{E}_{\text{и}}$ – энергия, затраченная на изготовление трактора, орудия, прицепа, МДж/га;

$\mathcal{E}_{\text{р.то}}$ – энергия, затраченная на техническое обслуживание, текущий и капитальный ремонт машин, входящих в состав МТА, МДж/га;

$\mathcal{E}_{\text{с.р.}}$ – энергия, затраченная на комплектование МТА, МДж/га;

$\mathcal{E}_{\text{упр}}$ – энергия, затраченная оператором на управление оператором, МДж/га;

$\mathcal{E}_{\text{ТСМ}}$ – энергия топливо-смазочных материалов, МДж/га;

$\mathcal{E}_{\text{пот}}$ – потери энергии, обусловленные несоблюдением оптимальных параметров и режимов работы агрегата, МДж/га.

Две составляющие $\mathcal{E}_{\text{ТСМ}}$ и $\mathcal{E}_{\text{пот}}$ могут быть в значительной степени снижены за счёт работы МТА на оптимальных скоростных и нагрузочных режимах.

Энергетические затраты технологического процесса определяются по формуле

$$E_{\text{п}} = E_{\text{п}} + E_0 + (E_{\text{ж}} + E_{\text{т}} + E_{\text{с}} + E_{\text{м}}) \cdot W_{\text{ч}}^{-1}, \quad (14)$$

где $E_{\text{п}}$ – прямые топливно-энергетические затраты, кДж/га;

E_0 – затраты энергии на производство удобрений, ядохимикатов, семян, МДж/га;

$E_{\text{ж}}$ – энергозатраты живого труда, МДж;

$E_{\text{т}}$, $E_{\text{с}}$ и $E_{\text{м}}$ – энергоёмкость трактора, сцепки и рабочей машины, МДж/ч;

$W_{\text{ч}}$ – часовая производительность МТА, га/ч.

В данном выражении именно прямые топливно-энергетические затраты $E_{\text{п}}$ связаны с проблемой эффективности использования сельскохозяйственных агрегатов.

Для оценки влияния переменных внешних факторов работы МТА на $E_{\text{п}}$ предлагается использовать выражение [4]:

$$\bar{E}_{\Pi} = (\bar{G}_T \cdot t_p \cdot \alpha_T) / W_{\text{ч}} + [(G_{\text{ТХ}} \cdot t_x + G_{\text{ТО}} \cdot t_0) \cdot \alpha_T] / W_{\text{ч}}, \quad (15)$$

где $\bar{G}_T = f(\bar{M}_C)$ – математическое ожидание часового расхода топлива, кг/ч;

α_T – энергетический эквивалент дизельного топлива, МДж/кг;

$\bar{W}_{\text{ч}} = f(\bar{M}_C)$ – математическое ожидание часовой производительности МТА, га/ч;

$G_{\text{ТХ}}$ и $G_{\text{ТО}}$ – расход топлива соответственно на холостой ход МТА и во время его остановок, кг/ч;

$t_p = 1; t_x = T_x / T_p; t_0 = T_0 / T_p$ – коэффициенты;

T_p, T_x, T_0 – соответственно время чистой работы МТА, время, затраченное на холостые ходы и остановки, ч;

\bar{M}_C – момент сопротивления на коленчатом валу двигателя трактора, $\text{Н} \cdot \text{м}$.

Известно, что в зависимости от вида технологической операции величина топливно-энергетических затрат на холостые ходы и остановки находится в пределах 10...15%.

После ряда преобразований выражение для расчёта основных прямых топливно-энергетических затрат принимает вид [6]:

$$\bar{E}_{\Pi O} = \frac{C_E \cdot \bar{G}_T}{N_e}, \quad (16)$$

где $C_E = (\alpha_T \cdot K_a) / (0,36 \eta_T \cdot \tau)$ – коэффициент;

K_a – удельное тяговое сопротивление рабочих машин, кН/м;

η_T – тяговый КПД трактора на рабочем режиме;

τ – коэффициент использования времени смены;

$\bar{N}_e = f(\bar{M}_c)$ – математическое ожидание эффективной мощности дизеля, кВт.

*Оценка влияния оптимальных показателей работы
машинно-тракторных агрегатов на энергозатраты
технологического процесса*

Анализ тенденций развития производства продукции растениеводства в России показывает, что рост затрат энергетических и материальных ресурсов опережает рост количества конечной продукции, то есть рост урожайности.

Концепция повышения производительности труда в агропромышленном комплексе, основанная на использовании интенсивных машинных технологий с применением мощной материалоемкой техники, в современных условиях показала свою несостоятельность.

Проблемная ситуация, обусловленная противоречием между необходимостью повышения урожайности сельскохозяйственных культур и необходимостью снижения энергоматериальных затрат на их производство, приводит к постановке весьма актуальной проблемы интенсификации процессов растениеводства при снижении затрат энергоматериальных ресурсов.

Анализ структуры энергозатрат на производство продукции растениеводства показывает, что она имеет 3 основных составляющих [6]:

- экологическая энергия $E_{Э}$;
- антропогенная энергия $E_{ан}$;
- энергия питания почвы $E_{п}$.

Эффективное использование системы машин при выполнении технологических операций относится ко второй составляющей энергозатрат на производство продукции растениеводства $E_{ан}$.

Энергозатраты при использовании МТА для выполнения различных технологических операций в составе машинных комплексов по возделыванию сельскохозяйственных культур определяются двумя основными составляющими:

- основные прямые топливно-энергетические затраты;
- энергозатраты, обусловленные несоблюдением оптимальных параметров и режимов работы агрегатов.

Работа МТА с отклонением от оптимума загрузки двигателя трактора, установленного с учётом влияния случайных внешних факторов, приводит к снижению производительности, удлинению времени выполнения операций технологического процесса и, следовательно, к нарушению агросроков возделывания сельскохозяйственных культур. Нарушение агросроков отрицательно влияет на урожайность, то есть увеличиваются потери энергии урожая и общее количество энергозатрат процесса производства сельскохозяйственной продукции. Поэтому при повышении эффективности использования МТА с учётом энергозатрат технологического процесса необходимо учитывать спектр факторов, влияющих на обе составляющие процесса, и разрабатывать

обобщающий критерий, который объединяет и прямые затраты и потери энергии урожая $E_{пот}$.

Энергия, потерянная через урожай, может быть определена следующим образом [6]:

$$E_{пот} = E_A + E_y, \quad (17)$$

где E_A – энергия, потерянная при нарушении агросроков выполнения операций, МДж/га;

E_y – энергия, потерянная в связи с уплотнением почвы, МДж/га.

Суммарные энергозатраты при использовании МТА можно определить по формуле

$$E_{мта} = E_{опр} + E_A, \quad (18)$$

где $E_{мта}$ – энергозатраты при использовании МТА, МДж/га;

$E_{опр}$ – основные прямые топливно-энергетические затраты, МДж/га;

E_A – энергозатраты, обусловленные несоблюдением оптимальных параметров и режимов работы агрегатов.

Основные прямые энергозатраты определяются по следующему соотношению [6]:

$$\bar{E}_{опр} = \frac{C_E \cdot \bar{G}_T}{\bar{N}_e}, \quad (19)$$

где $\bar{E}_{опр}$ – математическое ожидание основных прямых топливно-энергетических затрат;

$C_E = (\alpha_T \cdot K_a) / (0,36\eta_T \cdot \tau)$ – коэффициент;

α_T – энергетический эквивалент дизельного топлива, МДж/кг;

K_a – удельное тяговое сопротивление рабочих машин, кН/м;

η_T – тяговый КПД трактора на рабочем режиме;

τ – коэффициент использования времени смены;

$\overline{N_e}$ – математическое ожидание эффективной мощности дизеля, кВт [6].

N_e определяется по формуле

$$\overline{N_e} = C \cdot \left\{ \begin{array}{l} 0,5 \cdot \left[a^* \cdot \overline{M_k} + v^* \cdot \overline{M_k}^2 \cdot (1 + v_M^2) \right] - \\ \left[a_1^* \cdot \overline{M_k} + v_1^* \cdot \overline{M_k}^2 \cdot (1 + v_M^2) \right] \Phi(t_H) + \\ + v_1^* \cdot \varphi(t_H) \overline{M_k}^2 \cdot v_M \end{array} \right\}, \quad (20)$$

где $C = 9554^{-1}$; a^* , v^* , a_1^* , v_1^* – коэффициенты, определяемые при аппроксимации стендовой характеристики двигателя;

$\overline{M_k}$ – среднее значение крутящего момента на коленчатом валу, Н·м;

v_M – коэффициент вариации крутящего момента;

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

$\varphi(t) = (2\pi)^{-1/2} \exp(-0,5t_H^2)$ – плотность распределения вероятностей аргумента t_H , $t_H = (M_n - \bar{M}_k) / \sigma_n$;

M_n – номинальный крутящий момент, Н·м;

σ_n – стандарт крутящего момента;

\bar{G}_T – средний часовой расход топлива, кг/ч [6]:

$$\bar{G}_T = 0,5(a + b\bar{M}_k) - (a_1 + b_1\bar{M}_k)\Phi(t_H) + b_1\varphi(t_H)\sigma_M, \quad (21)$$

a, b, a_1, b_1 – коэффициенты, определяемые при аппроксимации стендовой характеристики двигателя;

σ_M – среднеквадратическое отклонение крутящего момента.

Нарушение агросроков выполнения операций по возделыванию культур происходит, как отмечалось ранее, при несоблюдении оптимальных параметров и режимов работы МТА и является предметом более детального изучения.

Для определения E_A предлагается использовать выражение

$$E_A = \frac{\sum_{i=1}^{N_i-1} (C_{\Pi i} \cdot W \cdot T_{cm} \cdot n_{cm}) + N^1 \cdot C_{\Pi i} \cdot W \cdot T_{cm} \cdot n_{cm}}{S_0}, \quad (22)$$

где $C_{\Pi i}$ – коэффициент потерь урожая, мДж/га·день;

$$C_{\Pi} = Y \cdot \Delta y \cdot Q / 100, \quad (23)$$

где Y – планируемая урожайность, кг/га;

Δu – потери урожая в % на 1 день увеличения агросроков выполнения операций;

N_i – число целых дней в N^1 ;

S_0 – объем работы на данной операции, га;

W – производительность агрегата, га/ч;

Q – энергоемкость одного килограмма продукта, МДж/кг (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Энергоемкость 1 кг продукта

Культура	Энергосодержание, МДж/кг
Пшеница	12,8
Овес	11,0
Ячмень	10,8
Картофель	2,4
Кукуруза на силос	2,0
Капуста	1,09

$$N^1 = \frac{S_0}{W \cdot T_{см} \cdot n_{см}}, \quad (24)$$

где N^1 – число дней, необходимых для выполнения объёма S_0 ;

S_0 – объем работы на данной операции, га;

$n_{см}$ – число смен в одном рабочем дне;

$T_{см}$ – продолжительность смены, ч;

W – производительность агрегата, га/ч.

Значения Δu устанавливаются с учётом условий природно-климатических зон либо могут быть приняты по таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Уменьшение потерь урожая Δu на 1 день сокращения периода полевых работ, %

Вид работы	Δu	Культура	Δu	
			посев	уборка
Лущение стерни	0,80	Колосовые	0,9	3,00
Безотвальная обработка	0,50	Кукуруза на силос	0,6	0,80
Культивация	0,30	Подсолнечник	0,8	3,60
Дискование	0,05	Горох	1,5	0,60
Боронование	1,20	Свекла	1,6	0,02
Вспашка зяби	0,50	Картофель	1,8	1,50

Общая энергопродуктивность урожая E_n определяется с помощью следующего выражения [6]:

$$E_n = E_{\text{э}} \cdot \eta_{\text{э}} + \Delta E_{ni}, \quad (25)$$

где $E_{\text{э}}$ – экологическая энергия, МДж;

$\eta_{\text{э}}$ – биоэнергетический КПД растений;

ΔE_{ni} – прибавка энергопродуктивности при энерготехнологических воздействиях E_{ai} .

$$\Delta E_{ni} = \sum_{i=1}^n E_{ai} \cdot \eta_{ai}, \quad (26)$$

где η_{ai} – биоэнергетический КПД оценки антропогенных воздействий.

Из выражения (26) получаем [6]:

$$\eta_{ai} = \Delta E_{ni} / \sum_{i=1}^n E_{ai}, \quad (27)$$

В таблице 1.3 представлены значения ΔE_{ni} для одной из природно-климатических зон Красноярского края [6]:

Таблица 1.3 – Чувствительность энергопродуктивности ΔE_{ni} яровой пшеницы к энерготехнологическим воздействиям E_{ai} в Восточной Сибири при средней урожайности 32 ц/га

Номер п\п	Вид энергетического воздействия E_{ai}	Прибавка, %	Прибавка, ц/га	Энергосодержание прибавки, МДж/га	Энергозатраты, МДж/га	Чувствительность энергосопряжения
1	Обработка почвы под пар с внесением удобрений	20	6,40	8192	6067	1,36

2	Посев с внесением минеральных удобрений	6	2,88	3686	2514	1,46
3	Зяблевая вспашка	5	1,60	2048	1557	1,32
4	Подготовка семян к посеву	3,5	1,12	1434	263	5,46
5	Лушение	4	1,28	1638	554	2,96
6	Предпосевная культивация	4	1,28	1638	246	6,66
7	Химпрополка	4	1,28	1638	255	6,42
8	Обработка ядами	4	1,28	1638	255	6,42
9	Закрытие влаги	3	0,96	1228	199	6,18
10	Боронование всходов	2	0,64	820	199	4,12

В процессе решения определенных технических задач функционирования сложных технических систем (к их числу необходимо отнести МТА) обычно возникает проблема установления функциональной зависимости выходных параметров от входных, тем более при случайном характере протекания процесса. Задача описания данной зависимости с помощью классических

аналитических методов также сложна. Все это значительно затрудняет и ставит под сомнение применение классической методики оптимизации работы сложных технических систем, так как большинство данных методов опирается на использование противоречивой информации о характере поведения целевой функции, устанавливающей связь между входными и выходными параметрами системы. Во многих работах для решения вышеозначенной проблемы предлагается использование более адекватных, менее требовательных методов оптимизации, которые являются в то же время более эффективными. В качестве подобных методов могут быть использованы так называемые эволюционные методы или генетические алгоритмы (ГА). Данные методы рассматривают моделирование различных процессов на основе природной эволюции [6].

Считается, что ГА наиболее эффективны при оптимизации многопараметрических, многоэкстремальных функций. Оптимизация функционирования сложных механических систем подразумевает поиск одного или нескольких значений оптимума, зависящего от влияния входных параметров или от значения определенного параметра, при котором достигается наиболее приемлемый результат оптимизации. Одним из преимуществ ГА считается его способность манипулировать многими параметрами одновременно, находя при этом наиболее рациональное решение задачи оптимизации [6].

Эволюционные методы (ГА) начали использовать при решении определенных задач ещё в 60–70 годы. Механизм ГА основан на законах генетических процессов развития биоорганизмов. Это, прежде всего, закон естественного отбора при развитии и совершенствовании популяций и создания при этом наиболее совершенного индивидуума.

Генетические алгоритмы, будучи частью эволюционных методов, используют такие биологические термины, как индивид, популяция, хромосома, скрещивание и мутация.

Для использования генетических алгоритмов в задачах оптимизации необходимо представление решения в виде бинарной строки, а также введение в рассмотрение функции пригодности (иными словами качества решения).

Для построения имитационной модели генетического алгоритма используются следующие сопоставления природных и компьютерных понятий:

- 1) индивид – решение задачи;
- 2) популяция – множество решений;
- 3) пригодность – качество решения;
- 4) хромосома – представление решения (строки символов из 0 и 1);
- 5) скрещивание – оператор поиска;
- 6) мутация – оператор поиска;
- 7) естественная селекция – повторное использование хороших решений.

Генетический алгоритм состоит из нескольких этапов, а именно:

- 1) генерирование хромосом случайным образом;
- 2) декодирование каждой хромосомы для получения индивидов;
- 3) оценивание пригодности каждого индивида;

4) генерирование новой популяции путем клонирования (копирования), частичной рекомбинации (скрещивания) и мутации хромосом наиболее пригодных индивидов.

Упрощенная схема генетического алгоритма представлена на рисунке 1.2.

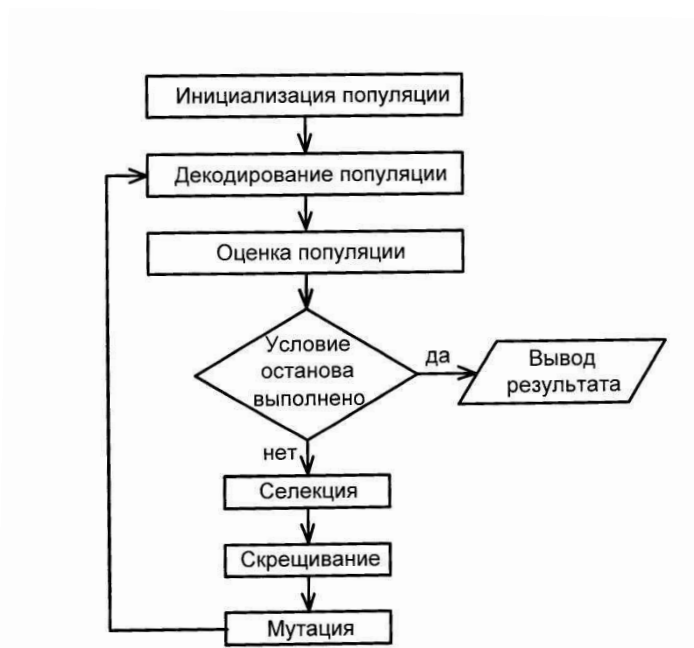


Рисунок 1.2 – Упрощенная схема генетического алгоритма

Основные критерии (условия) останова:

- а) алгоритм останавливается после истечения определенного числа итераций (полных циклов);
- б) алгоритм останавливается, если в течение определенного числа итераций полученное решение не было улучшено;
- в) смешанный: применяются сразу оба предыдущих критерия.

Применение нового подхода к решению задачи оптимизации работы сложных механических систем необходимо, в данном случае, рассмотреть на примере определения оптимальных параметров и

режимов работы МТА. Зависимость выходных параметров Y от входных величин X представлены на рисунке 1.3.

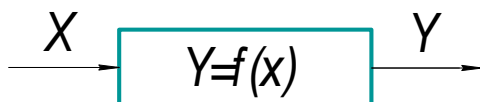


Рисунок 1.3 – Модель типа «вход – выход»

Оптимальными выходными параметрами и режимами работы данной системы будут являться такие, при которых качественные и количественные показатели отвечают требованиям наибольшей эффективности.

В качестве входных параметров рассматриваются крутящий момент на коленчатом валу двигателя M_k , частота вращения коленчатого вала n_d и сила тяги на крюке $P_{кр}$. На выходе получаем эффективную мощность двигателя N_e , часовой расход топлива G_T , удельный расход g_e , тяговую мощность $N_{кр}$, удельный тяговый расход топлива и скорость движения агрегата v_p . Зависимость выходных параметров от входных величин можно установить, используя следующие целевые функции [6]:

$$(n_d, N_e, G_T, g_e) = f(M_k); \quad (28)$$

$$(M_k, N_e, G_T, g_e) = f(n_d); \quad (29)$$

$$(v_p, N_{кр}, G_T, g_{кр}) = f(P_{кр}). \quad (30)$$

Предварительный анализ функций связи между входными воздействиями и выходными параметрами МТА показывает, что они являются нелинейными, многоэкстремальными и заданы алгоритмически, область определения и ограничения, накладываемые на целевую функцию, носят сложный нелинейный характер.

Таким образом, имеет место задача глобальной оптимизации с алгоритмически заданными целевой функцией и функциями-ограничениями.

При нахождении оптимальных режимов работы МТА первостепенное значение имеет выбор критерия оптимизации. Существует несколько групп критериев оптимизации для решения поставленной задачи. Рассмотрим критерии по энергетическим показателям двигателя:

- максимум эффективной мощности;
- максимум часового расхода топлива;
- минимум удельного расхода топлива.

Минимум удельного расхода топлива является компромиссным критерием по сравнению с максимумом мощности и максимумом часового расхода топлива.

Оптимальные режимы работы МТА могут быть найдены с помощью классического метода [1]. Данная методика была представлена выше. Основные недостатки данного метода:

1. Вышеназванные критерии обладают определенной противоречивостью по ряду причин. В реальных условиях на мощность и расход топлива могут влиять различные факторы, нарушающие согласованность действия критериев оптимизации. Эти

факторы могут быть переменными величинами в вероятностно-стохастическом смысле.

2. Исходя из 1-го пункта вариантов нахождения оптимизируемой величины достаточно и каждому варианту соответствуют значения оптимизируемых целевых функций. В этом случае перебор всех возможных вариантов решения задачи затруднен или невозможен.

3. В этих условиях классические методы неэффективны, следовательно, есть необходимость в использовании метода прямого поиска, когда целевые функции и функции ограничения могут быть заданы алгоритмически.

Для решения задачи могут быть выбраны генетические алгоритмы [6], так как для них такая задача не составляет дополнительных трудностей, в отличие от обычных подходов математического программирования.

Преимущества генетического алгоритма:

1) отсутствие жестких требований, накладываемых на характер и свойства целевых функций (линейность, выпуклость и т.п.). Требуется только возможность вычисления значения целевой функции в любой точке поискового пространства;

2) лучше чем другие методы работает с полимодальными функциями и несвязными поисковыми областями;

3) универсальность: можно применять алгоритм для решения разнообразных задач, не изменяя его структуры;

4) гибкость: для решения новой задачи нужно лишь переписать функцию пригодности;

5) генетические алгоритмы очень хороши в случаях, когда:

- неизвестен способ нахождения точного решения задачи;

- способ нахождения точного решения существует, но очень сложен в реализации и требует больших затрат ресурсов.

Решение проблемы оптимизации параметров и режимов работы МТА с помощью ГА имеет два основных варианта, а именно: однокритериальная оптимизация и многокритериальная оптимизация.

Если рассматривать поставленную задачу как однокритериальную (принимая за критерий максимум эффективной мощности), то оптимальным решением задачи будет, естественно, такое, при котором целевая функция принимает максимальное значение.

Используя соответствующие механизмы работы ГА, можно путем подбора определенных характеристик и параметров двигателя максимально снизить негативное влияние случайных входных факторов на такую сложную систему, как машинно-тракторный агрегат.

В качестве переменных могут быть использованы частота вращения дизеля и крутящий момент, сила тяги на крюке трактора и др., а также их коэффициенты вариации. Варьируя вышеназванными переменными оптимизации с использованием методики ГА, мы имеем возможность подбора такой регуляторной характеристики или тяговой характеристики трактора, при наличии которой их деформация под воздействием переменных внешних факторов будет минимальной [6]. При этом необходимо учитывать параметры и характеристики дизеля и устройств, отвечающих за протекание регуляторной (тяговой) характеристики в реальных координатах.

Вследствие случайного характера нагрузки энергетические показатели агрегатов в эксплуатационных условиях также являются случайными величинами и определяются своими вероятностно-статистическими оценками (законами распределения, средними значениями, дисперсиями, стандартами, коэффициентами вариации и др.).

Для определения вероятностно-статистических оценок энергетических показателей мобильных СХА используется метод функций случайных аргументов, предложенный профессорами Л.Е. Агеевым и С.А. Иофиновым.

Сущность методики заключается в том, что агрегат рассматривается в виде модели «вход-выход» (рисунок 1.4, а). Входные x_i и выходные y_i переменные величины связаны детерминированными (неслучайными) зависимостями $y_i = f(x_i)$. Эти зависимости устанавливаются в процессе аппроксимации типовых (или стендовых) характеристик двигателя (рисунок 1.4, б, в).

В качестве входной переменной величины x (случайного аргумента) принимается момент сопротивления на коленчатом валу двигателя M_k . Для эксплуатационных условий характерен нормальный закон распределения нагрузки, описываемый выражением

$$\varphi(x) = (\sigma_x \sqrt{2\pi})^{-1} \exp\left[-(x - \bar{x})^2 / 2\sigma_x^2\right], \quad (31)$$

где \bar{x}, σ_x – соответственно среднее значение и стандарт аргумента.

Для упрощения расчётов удобно использовать выражение [1]:

$$\varphi(x) = \sigma_x^{-1} \cdot \varphi(t), \quad (32)$$

где $\varphi(t) = (2\pi)^{-1/2} \exp(-0,5t^2)$ – плотность распределения вероятности нормированного и центрированного нормального распределения, $t = (x - \bar{x}) / \sigma_x$ – аргумент.

В качестве функций связи $y_i = f(x_i)$ для энергетических показателей используются зависимости [1]:

1) частоты вращения вала двигателя (рисунок 1.4, в):

$$n_g = f(M_K) = \begin{cases} A_1^* + B_1^* M_K & \text{при } M_K \leq M_H \\ A_2^* + B_2^* M_K & \text{при } M_K > M_H \end{cases} \quad (33)$$

2) часового расхода топлива (рисунок 1, 4, в):

$$G_T = f(M_K) = \begin{cases} A_1 + B_2 M_K & \text{при } M_K \leq M_H; \\ A_2 + B_2 M_K & \text{при } M_K > M_H, \end{cases} \quad (34)$$

3) эффективной мощности двигателя (рисунок 1.4, в):

$$N_e = f(M_K) = \begin{cases} C(A_1^* M_K + B_1^* M_K^2) & \text{при } M_K \leq M_H; \\ C(A_2^* M_K + B_2^* M_K^2) & \text{при } M_K > M_H, \end{cases} \quad (35)$$

4) удельного эффективного расхода топлива (рисунок 1.4, в):

$$g_e = f(M_K) = \begin{cases} C_1(A_1 + B_1 M_K) / (A_1^* M_K + B_1^* M_K^2) & \text{при } M_K \leq M_H; \\ C_1(A_2 + B_2 M_K) / (A_2^* M_K + B_2^* M_K^2) & \text{при } M_K > M_H, \end{cases} \quad (36)$$

где $A_1^*, A_2^*, A_1, A_2, B_1^*, B_2^*, B_1, B_2$ – постоянные величины и угловые коэффициенты, определяемые при аппроксимации характеристик двигателя по формулам [1]:

$$A_1^* = n_x, \quad A_2^* = n_n + [(n_n - n_{\min}) / (K - 1)],$$

$$\begin{aligned}
A_1 &= G_{TX}, \quad A_2 = G_{TH} + [(G - G_{TO}) / (K - 1)], \\
B_1^* &= (n_H - n_X) / M_H, \quad B_2^* = (n_{\min} - n_H) / (M_{\max} - M_H), \\
B_1 &= (G_{TH} - G_{TX}) / M_H, \quad B_2 = (G_{TO} - G_{TH}) / (M_{\max} - M_H).
\end{aligned} \tag{37}$$

Далее находим коэффициенты $a^*, a_1^*, b^*, b_1^*, a, a_1, b, b_1$ по формулам:

$$a^* = A_1^* + A_2^*, \quad a_1^* = A_2^* - A_1^*, \quad b^* = B_1^* + B_2^*, \quad b_1^* = B_2^* - B_1^*, \quad a = A_1 + A_2, \quad a_1 = A_2 - A_1, \tag{38}$$

При вычислении коэффициентов используются следующие параметры двигателя: M_H, M_{\max} – номинальный и максимальный крутящие моменты на коленчатом валу, Нм; $K = M_{\max} / M_H$ – коэффициент приспособляемости; $n_{\text{нн}}, n_{\min}, n_X$ – частоты вращения вала двигателя: номинальные, минимальные и на холостом ходу двигателя, мин^{-1} ; $G_{\text{тн}}, G_{\text{тх}}, G_{\text{то}}$ – часовой расход топлива на номинальном режиме, холостом ходу при максимальном крутящем моменте, кг/ч.

Для двигателя постоянной мощности в качестве функций связи $y_i = f(x_i)$ для энергетических показателей используются зависимости (рисунок 1.4, б) [6]:

$$n_D = f(M_K) = \begin{cases} f_1(M_K) = (A_1^* + B_1^* M_K) & \text{при } 0 \leq M_K \leq M_H \\ f_2(M_K) = (A_2^* + B_2^* M_K) & \text{при } M_H \leq M_K \leq M_{\max} \\ f_3(M_K) = (A_3^* + B_3^* M_K) & \text{при } M_H \leq M_K \leq M_{\max} \end{cases} \tag{39}$$

где n_D – частота вращения коленчатого вала, мин^{-1} ;

M_K – крутящий момент на валу двигателя;

$f_1(M_K), f_2(M_K), f_3(M_K)$ – функции связи, характеризующие работу двигателя на различных ветвях стендовой характеристики;

$A_1^*, B_1^*, A_2^*, B_2^*, A_3^*, B_3^*$ – расчетные коэффициенты, определяемые при аппроксимации характеристики двигателя на рисунке 1.4, б (таблица 1.4);

M_{max} – максимальный крутящий момент, Н·м;

M_{π} – предельный крутящий момент, Н·м;

M_H – номинальный крутящий момент, Н·м.

Таблица 1.4 – Коэффициенты для расчета математических ожиданий частоты вращения и эффективной мощности двигателя постоянной мощности

Коэффициент	Расчетная формула
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^*	$A_1^* + A_3^*$
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^*	$B_2^* - B_3^*$

$n_x, n_H, n_{\pi}, n_{min}$ – частота вращения вала двигателя соответственно: холостого хода, при номинальном моменте, при предельном моменте и при максимальном моменте, $мин^{-1}$; $\kappa_1 = M_{max}/M_{\pi}$; $\kappa_2 = M_{\pi}/M_H$.

Аппроксимация стендовой характеристики двигателя по мощности на рисунке 1.4, б выглядит следующим образом [6]:

$$N_e = f(M_k) = \begin{cases} f_1(M_k) = C(A_1^* M_k + B_1^* M_k^2) \text{ при } 0 \leq M_k \leq M_H \\ f_2(M_k) = C(A_2^* M_k + B_2^* M_k^2) \text{ при } M_n \leq M_k \leq M_H \\ f_3(M_k) = C(A_3^* M_k + B_3^* M_k^2) \text{ при } M_n \leq M_k \leq M_{max} \end{cases}, \quad (40)$$

где N_e – эффективная мощность двигателя, кВт;

M_k – крутящий момент на валу двигателя;

$f_1(M_k), f_2(M_k), f_3(M_k)$ – функции связи, характеризующие работу двигателя на различных ветвях регуляторной характеристики;

C – расчетный коэффициент, $C = 9550^{-1}$

M_{max} – максимальный крутящий момент, Н·м;

M_n – предельный крутящий момент, Н·м;

M_H – номинальный крутящий момент, Н·м.

$A_1^*, B_1^*, A_2^*, B_2^*, A_3^*, B_3^*$ – постоянные величины и угловые коэффициенты, определяемые по стендовой характеристике двигателя (таблица 1.4).

Для расчета математических ожиданий часового расхода топлива его характеристика на рисунке 1.4, б аппроксимируется с помощью следующего выражения [6]:

$$G_T = f(M_k) = \begin{cases} f_1(M_k) = (A_1 + B_1 M_k) \text{ при } 0 \leq M_k \leq M_H \\ f_2(M_k) = (A_2 + B_2 M_k) \text{ при } M_n \leq M_k \leq M_H \\ f_3(M_k) = (A_3 + B_3 M_k) \text{ при } M_n \leq M_k \leq M_{max} \end{cases} \quad (41)$$

где G_T – часовой расход топлива;

$A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3$ – постоянные величины и угловые коэффициенты, определяемые по стендовой характеристике двигателя (таблица 1.5).

Для определения вероятностно-статистических оценок энергетических показателей используются формулы [1]:

плотности распределения вероятностей:

$$\varphi(y) = \varphi(x) | dx / dy |; \varphi(y) = \varphi[\psi(y)] / d\psi(y) | dx |; \quad (42)$$

средних значений:

$$\bar{y} = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)\varphi(x)dx; \quad (43)$$

дисперсий:

$$D(y) = \int_{-\infty}^{\infty} [y - \bar{y}]^2 \varphi(y)dy = \int_{-\infty}^{\infty} [f(x) - \bar{y}]^2 \varphi(x)dx; \quad (44)$$

стандартов и коэффициентов вариации:

$$\sigma_y = [D(y)]^{1/2}; \nu_y = \sigma_y / \bar{y}, \quad (45)$$

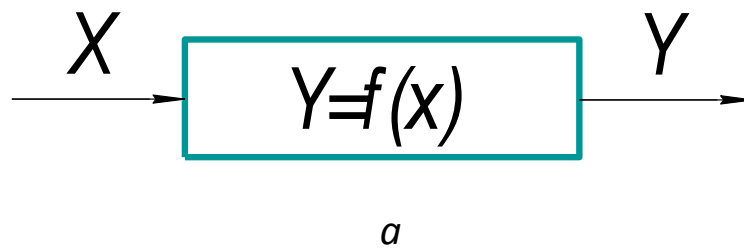
где $\varphi(y)$, $\varphi(x)$, $\varphi[\psi(y)]$ – плотности распределения вероятностей соответственно выходного показателя (энергетического показателя), аргумента и обратной детерминированной функции; $f(x)$ – функция связи; $\psi(y)$ – обратная детерминированная функция; \bar{y} , $D(y)$, σ_y , ν_y – соответственно среднее значение, дисперсия, стандарт и коэффициент вариации выходного показателя.

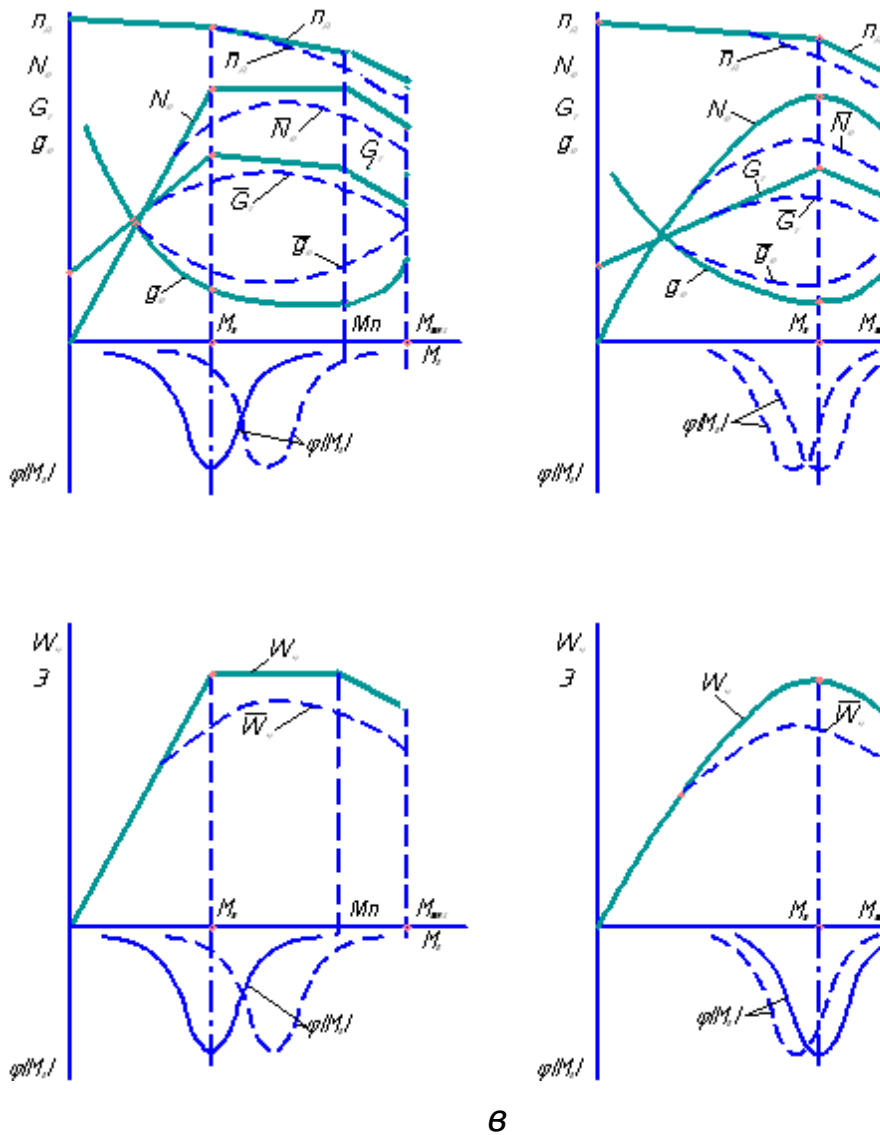
Таблица 1.5 – Коэффициенты для расчета математических ожиданий часового расхода топлива трактора с двигателем постоянной мощности

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	$-(G_{ТХ} - G_{ТН})/M_H$
B_2	$-(G_{ТН} - G_{ТП})/(M_{П} - M_H)$
B_3	$-(G_{ТП} - G_{ТО})/(M_{max} - M_{П})$
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	$B_2^* - B_3^*$

$G_{ТХ}, G_{ТН}, G_{ТП}, G_{ТО}$ – часовой расход топлива соответственно: холостого хода, номинальный, для предельного крутящего момента, при максимальном крутящем моменте, кг/ч; $\kappa_1 = M_{max}/M_n$; $\kappa_2 = M_n/M_H$





б

в

Рисунок 1.4 – Схемы для определения вероятностно-статистических оценок энергетических и технико-экономических показателей МТА: а – одномерная модель функционирования МТА; б – показатели МТА при случайном характере колебаний крутящего момента на валу двигателя с полкой постоянной мощности; в – показатели МТА при случайном характере колебаний крутящего момента на валу двигателя с классической регуляторной характеристикой; M_n – крутящий момент на валу двигателя, Н·м; N_d – частота вращения коленчатого вала, мин^{-1} ; N_e – эффективная мощность, кВт; G_T – часовой расход топлива, кг/ч; g_e – удельный расход топлива, г/кВт·ч; M_{max} – максимальный крутящий момент, Н·м; M_n – номинальный крутящий момент, Н·м; M_n – предельный крутящий момент, Н·м; W_e – часовая производительность, га/час; $\varphi(M, l)$ – плотность распределения крутящего момента на валу дизеля

При определении средних значений и дисперсий по формулам (43) и (44) в качестве аргумента принимается непрерывная случайная величина x , определяемая параметрами \bar{x} и σ_x . Модели, полученные с использованием этих соотношений, носят название параметрических.

Нагрузочный режим агрегата характеризуется уровнем λ_M и мерой рассеивания ν_M (коэффициентов вариации) момента сопротивления M_k на коленчатом валу двигателя, определяемыми по формулам [1, 2]

$$\lambda_M = \overline{M_k} / M_n; \quad \nu_M = \sigma_M / \overline{M_k}. \quad (46)$$

Уровень реализации выходного показателя Y_i на данном нагрузочном режиме оценивается соответствующим индексом λ_y [1, 2]:

$$\lambda_y = \overline{Y_i} / Y_{in}, \quad (47)$$

где Y_{in} – базовое (номинальное) значение показателя Y . Применяются также обобщенные индексы, оценивающие совместный уровень реализации нескольких показателей.

1.2. Оценка средних значений основных энергетических показателей МТА по параметрическим моделям

Для оценки средних значений и уровней реализации (единичных индексов) основных энергетических показателей мобильных СХА при нормальном законе распределения нагрузки применяются вероятностные математические модели [1]:

1) частоты вращения коленчатого вала двигателя:

$$\begin{aligned} \bar{n}_g &= 0,5(a^* + b^* \bar{M}_K) - (a_1^* + b_1^* \bar{M}_K) \Phi(t_H) + b_1^* \sigma_M \varphi(t_H); \\ \lambda_{\bar{n}_g} &= \bar{n}_g / n_H, \end{aligned} \quad (48)$$

2) часового расхода топлива:

$$\begin{aligned} \bar{G}_T &= 0,5(a + b \bar{M}_K) - (a_1 + b_1 \bar{M}_K) \Phi(t_H) + b_1 \sigma_M \varphi(t_H); \\ \lambda_{\bar{G}_T} &= \bar{G}_T / G_{T_H}; \end{aligned} \quad (49)$$

3) эффективной мощности двигателя:

$$\begin{aligned} \bar{N}_e &= c(0,5(a^* \bar{M}_K + b^* M_K^2 + b^* \sigma_M^2) - \\ &- (a_1^* M_K + b_1^* \bar{M}_K^2 + b_1^* \sigma_M^2) \Phi(t_H) + b_1^* \phi(t_H) \bar{M}_K \sigma_M); \end{aligned} \quad (50)$$

4) удельного эффективного расхода топлива:

$$\bar{g}_e = 10^3 \bar{G}_T / \bar{N}_e; \quad \lambda_{\bar{g}_e} = \bar{g}_e / g_{eH}. \quad (51)$$

Здесь $t_H = (M_H - \bar{M}_K) / \sigma_M$ – номинальное значение аргумента t ;

$$\Phi(t_H) = (2\pi)^{-1/2} \int_0^{t_H} e^{-t^2/2} dt; \quad \varphi(t_H) = (2\pi)^{-1/2} e^{-t^2/2}. \quad (52)$$

Математические ожидания частоты вращения коленчатого вала двигателя постоянной мощности с учетом выражений (39), (43), (44) рассчитываются по формуле [6]

$$\begin{aligned} \bar{n}_d = f(M_\kappa) = & (\sigma_M \sqrt{2\pi})^{-1} \left\{ \int_{-\infty}^{M_H} (A_1^* + B_1^* M_\kappa) \exp\left[-(M_\kappa - \bar{M}_\kappa)^2 / (2\sigma_M^2)\right] dM_\kappa + \right. \\ & + \int_{M_H}^{M_{II}} (A_2^* + B_2^* M_\kappa) \exp\left[-(M_\kappa - \bar{M}_\kappa)^2 / (2\sigma_M^2)\right] dM_\kappa + \\ & \left. + \int_{M_{II}}^{\infty} (A_3^* + B_3^* M_\kappa) \exp\left[-(M_\kappa - \bar{M}_\kappa)^2 / (2\sigma_M^2)\right] dM_\kappa \right\} = \end{aligned} \quad (53)$$

$$\begin{aligned} \bar{n}_d = f(M_\kappa) = & 0,5(a^* + b^* \bar{M}_\kappa) + (a_1^* + b_1^* \bar{M}_\kappa) \Phi(\alpha_H) + (a_2^* + b_2^* \bar{M}_\kappa) \Phi(\alpha_{II}) - \\ & - \sigma_M \{ (b_1^* \varphi(\alpha_H) + b_2^* \varphi(\alpha_{II})) \}, \end{aligned}$$

где \bar{n}_d – математическое ожидание частоты вращения коленчатого вала, мин^{-1} ;

$$\Phi(\alpha_H) = (2\pi)^{-1/2} \int_0^{\alpha_H} e^{-\alpha^2/2} d\alpha \text{ – функция Лапласа};$$

$\varphi(\alpha_H) = (2\pi)^{-1/2} \exp(-0,5\alpha_H^2)$ – плотность распределения вероятностей аргумента α_H для $Y = f(M_\kappa)$;

$$\Phi(\alpha_{II}) = (2\pi)^{-1/2} \int_0^{\alpha_{II}} e^{-\alpha^2/2} d\alpha \text{ – функция Лапласа};$$

$\varphi(\alpha_{II}) = (2\pi)^{-1/2} \exp(-0,5\alpha_{II}^2)$ – плотность распределения вероятностей аргумента α_{II} ;

$$\alpha_{II} = \frac{M_{II} - \bar{M}_\kappa}{\sigma_M}, \alpha_H = \frac{M_H - \bar{M}_\kappa}{\sigma_M};$$

$a_1^*, b_1^*, a_2^*, b_2^*$ – расчетные коэффициенты, определяемые при аппроксимации характеристики двигателя в зависимости от частоты вращения коленчатого вала (таблица 1.4);

\bar{M}_κ – среднее значение крутящего момента на валу двигателя, Н·м;

σ_M – стандарт крутящего момента, Н·м.

Математическое ожидание эффективной мощности ДПМ находим с помощью формулы [6]

$$\begin{aligned} \bar{N}_e = f(M_\kappa) &= C / (\sigma_M \sqrt{2\pi}) \left\{ \int_{-\infty}^{M_H} (A_1^* + B_1^* M_\kappa) \exp\left[-(M_\kappa - \bar{M}_\kappa)^2 / (2\sigma_M^2)\right] dM_\kappa + \right. \\ &+ \int_{M_H}^{M_\Pi} (A_2^* + B_2^* M_\kappa) \exp\left[-(M_\kappa - \bar{M}_\kappa)^2 / (2\sigma_M^2)\right] dM_\kappa + \\ &+ \left. \int_{M_\Pi}^{\infty} (A_3^* + B_3^* M_\kappa) \exp\left[-(M_\kappa - \bar{M}_\kappa)^2 / (2\sigma_M^2)\right] dM_\kappa \right\} = \quad (54) \\ &= c^{-1} \left[0,5(a^* \bar{M}_\kappa + b^* \bar{M}_\kappa^2 + b^* \sigma_M^2) + (a_1^* \bar{M}_\kappa + b_1^* \bar{M}_\kappa^2 + b_1^* \sigma_M^2) \Phi(t_H) + \right. \\ &\left. + (a_2^* \bar{M}_\kappa + b_2^* \bar{M}_\kappa^2 + b_2^* \sigma_M^2) \Phi(t_\Pi) - \sigma_M \{b_1^* \varphi(t_H) \bar{M}_\kappa + b_2^* \varphi(t_\Pi) \bar{M}_\kappa\} \right], \end{aligned}$$

где c^{-1} – коэффициент, $c^{-1} = 1/9550$;

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

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

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

$\Phi(t_\Pi) = (2\pi)^{-1/2} \int_0^{t_\Pi} e^{-t^2/2} dt$ – функция Лапласа для $Y = f(M_\kappa)$;

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

$$t_H = \frac{M_H - \bar{M}_K}{\sigma_M}, t_{II} = \frac{M_{II} - \bar{M}_K}{\sigma_M};$$

σ_M – стандарт крутящего момента, Н·м;

M_H – номинальное значение крутящего момента, Н·м;

M_{II} – предельное значение крутящего момента, Н·м;

$a_1^*, b_1^*, a^*, b^*, a_2^*, b_2^*$ – расчетные коэффициенты, определяемые при аппроксимации характеристики двигателя в зависимости от крутящего момента на коленчатом валу (таблица 1.4) [6].

Используя выражения (11), (12), (13), получим зависимость для расчета математических ожиданий часового расхода топлива:

$$\begin{aligned} \bar{G}_T = f(M_K) &= (\sigma_M \sqrt{2\pi})^{-1} \left\{ \int_{-\infty}^{M_H} (A_1 + B_1 M_K) \exp\left[-(M_K - \bar{M}_K)^2 / (2\sigma_M^2)\right] dM_K + \right. \\ &+ \int_{M_H}^{M_{II}} (A_2 + B_2 M_K) \exp\left[-(M_K - \bar{M}_K)^2 / (2\sigma_M^2)\right] dM_K + \\ &\left. + \int_{M_{II}}^{\infty} (A_3 + B_3 M_K) \exp\left[-(M_K - \bar{M}_K)^2 / (2\sigma_M^2)\right] dM_K \right\} = \end{aligned} \quad (55)$$

$$\begin{aligned} &= 0,5(a + b \bar{M}_K) + (a_1 + b_1 \bar{M}_K) \Phi(\alpha_H) + (a_2 + b_2 \bar{M}_K) \Phi(\alpha_{II}) - \\ &- \sigma_n \{(b_1 \varphi(\alpha_H) + b_2 \varphi(\alpha_{II}))\}, \end{aligned}$$

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 регуляторной характеристики дизеля по расходу топлива (таблица 1.5);

$$\Phi(\alpha_H) = (2\pi)^{-1/2} \int_0^{\alpha_H} e^{-\alpha^2/2} d\alpha - \text{функция Лапласа};$$

$\varphi(\alpha_H) = (2\pi)^{-1/2} \exp(-0,5\alpha_H^2)$ – плотность распределения вероятностей аргумента α_H для; $Y = f(M_K)$;

$\Phi(\alpha_H) = (2\pi)^{-1/2} \int_0^{\alpha_H} e^{-\alpha^2/2} d\alpha$ – функция Лапласа;

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

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

\bar{M}_K – среднее значение крутящего момента на валу двигателя, Н·м;

σ_M – стандарт крутящего момента, Н·м.

2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА СРЕДНИХ ЗНАЧЕНИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ И ОПТИМАЛЬНЫХ НАГРУЗОЧНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ МТА

2.1. Определение средних значений энергетических показателей работы МТА

Средние значения энергетических показателей двигателя с классической стендовой характеристикой рассчитываем, используя формулы (37), (38), (49), (50).

Коэффициенты $A_1^*, A_2^*, A_1, A_2, B_1^*, B_2^*, B_1, B_2$ рассчитываем по формулам (37) с использованием таблицы 1 приложения. Далее находим по формулам (38) коэффициенты $a^*, a_1^*, b^*, b_1^*, a, a_1, b, b_1$, которые входят в формулы (48), (49), (50), (51) по расчету $\bar{n}_d, \bar{N}_e, \bar{G}_T, \bar{g}_e$. Используя стендовую характеристику двигателя $y =$

$f(M_k)$, выбираем средние значения крутящего момента M_k по оси M_k (рисунок 1.4, в). Зная коэффициент вариации M_k (приложение, таблица 1), находим стандарт крутящего момента по формуле

$$\sigma_{\overline{M}_k} = v_{M_k} \cdot \overline{M}_k, \quad (56)$$

где \overline{M}_k – среднее значение крутящего момента;

v_{M_k} – коэффициент вариации M_k .

Далее находим значение параметра t_H по формуле

$$t_H = (M_H - \overline{M}_k) / \sigma_{\overline{M}_k}, \quad (57)$$

где M_H – номинальное значение крутящего момента.

Зная t_H , по таблицам 2, 3 приложения находим значения $\Phi(t_H)$, $\varphi(t_H)$, которые входят в формулы (49), (50).

Рассчитав таким образом средние значения с использованием нескольких точек по оси M_k стендовой характеристики, строим эксплуатационные характеристики тракторного двигателя. Они являются реальными характеристиками работы дизеля под воздействием переменных внешних факторов (в данном случае переменного крутящего момента).

Аналогично проводим расчет средних значений энергетических показателей двигателей постоянной мощности по формулам (54), (55).

2.2. Определение оптимальных нагрузочных режимов работы МТА

При определении оптимальных нагрузочных режимов работы двигателя в условиях переменной нагрузки в качестве критерия

оптимизации принимаем максимум эффективной мощности двигателя [1]. Расчеты проводятся с учетом выражений для расчета энергетических показателей двигателя с классической регуляторной характеристикой.

Используем классический метод. Исследуя на экстремум выражение (49), находим его производную и приравниваем её к нулю: $d\bar{N}_e / d\bar{M}_\kappa = 0$. При этом получаем следующее уравнение:

$$Y_1(t_H) - Y_2(t_H) = 0, \quad (58)$$

где $Y_1(t_H) = 0,5a^* + b^* M_K - b_1^* (2\bar{M}_K - M_H) \Phi(t_H)$;

$$Y_2(t_H) = -2b_1^* \varphi(t_H) \sigma_H.$$

Данное уравнение решается графически (рисунок 2.1).

Для этого берем значения t_H по оси t_H (рисунок 2.1), подставляя их в формулу

$$\bar{M}_K = \frac{M_H}{1 + t_H \cdot v_{M_K}}, \quad (59)$$

находим значение \bar{M}_κ . Далее находим значение σ_{M_κ} по формуле

$$\sigma_{M_K} = v_{\bar{M}_K} \cdot \bar{M}_K. \quad (60)$$

По таблице 2 приложения находим значения $\Phi(t_H)$ и $\varphi(t_H)$ в зависимости от того или иного значения t_H . Подставляя значения $\bar{M}_\kappa, G_m, \varphi(t_H)$ и $\Phi(t_H)$ в выражения по расчету $y_1(t_H)$ и нанося их

значения на график (рисунок 1.5), находим точку пересечения $y_1(t_H)$ и $y_2(t_H)$.

Эта точка будет являться экстремальным значением параметра t_H^* . Зная t_H^* , находим \overline{M}_K^* по формуле (59) и $\Phi^*(t_H^*)$, $\varphi(t_H^*)$ по таблицам 2, 3 приложения.

Подставляя значения \overline{M}_K^* , $\Phi^*(t_H^*)$, $\varphi(t_H^*)$ и σ_H^* в формулу (49), находим \overline{N}_e^* .

Оптимальную степень нагрузки находим по формуле

$$\lambda_{\overline{M}}^* = 1 - M_H^{-1} t_H^* \sigma_M^*. \quad (61)$$

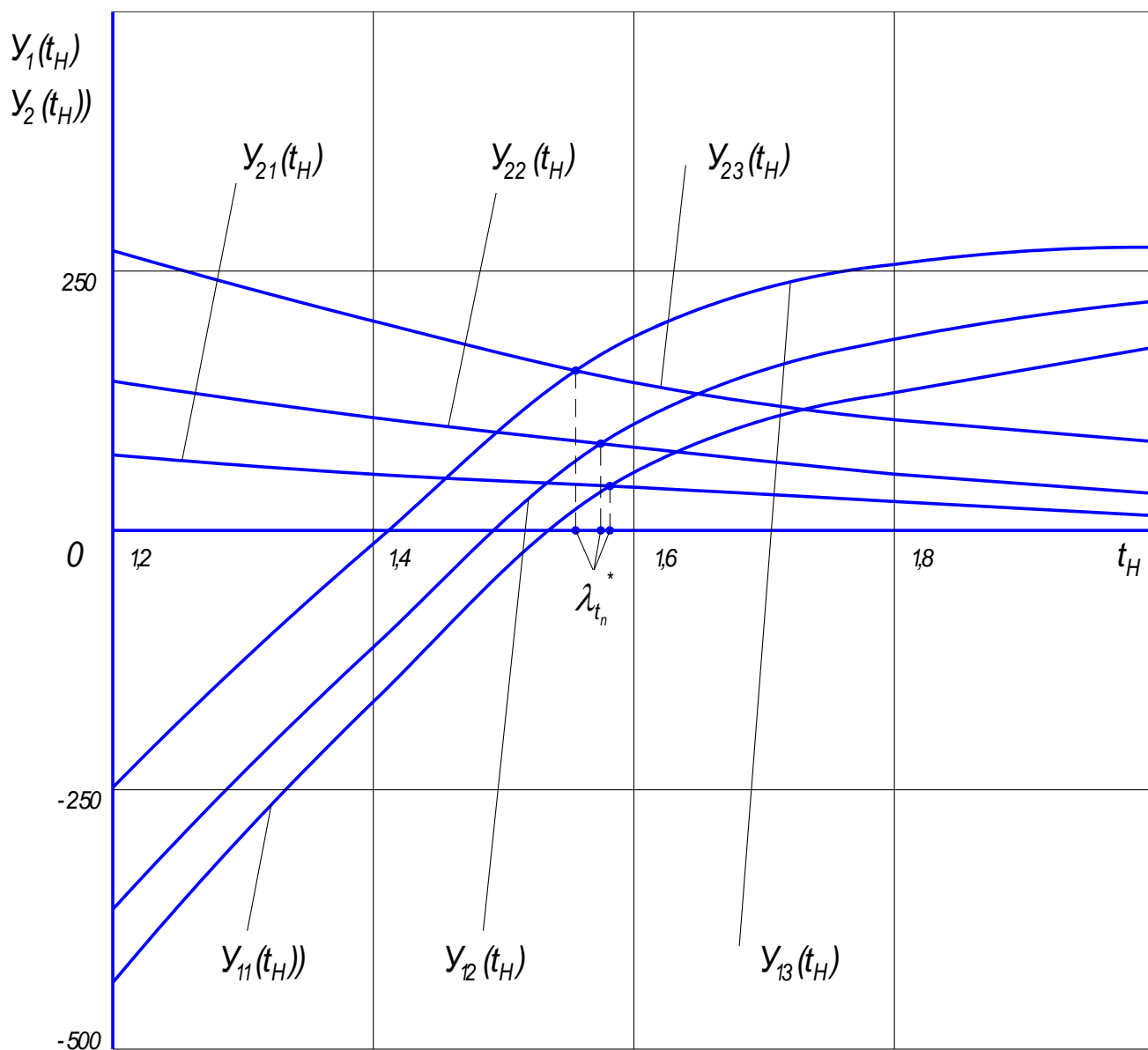


Рисунок 2.1 – Графическое определение аргумента t_H^*

по эффективной мощности: 1 – $v_n = 0,025$; 2 – $v_n = 0,05$; 3 – $v_n = 0,1$

3. МЕТОДИКА МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГОЗАТРАТ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МАШИННО- ТРАКТОРНЫХ АГРЕГАТОВ

Задача оптимизации параметров и режимов работы сельскохозяйственных машинно-тракторных агрегатов при

воздействию на них переменных внешних факторов должна рассматриваться как многокритериальная с участием определенного количества переменных, многие из которых являются так называемыми независимыми переменными. Переменные величины, входящие в состав целевых функций, определяющих связь между входными воздействиями и выходными параметрами агрегатов, имеют свои области определения значений. В пределах этих областей определения или ограничения можно находить оптимумы параметров двигателя и трактора, входящего в состав мобильного машинно-тракторного агрегата, и на их основе определять уровень энергоматериальных затрат при использовании МТА в процессе производства сельскохозяйственной продукции.

Энергозатраты при работе агрегатов на режиме рабочего хода в процессе выполнения различных технологических операций по возделыванию сельскохозяйственных культур определяются двумя основными составляющими [6]:

- основные прямые топливно-энергетические затраты;
- энергозатраты, обусловленные несоблюдением оптимальных параметров и режимов работы агрегатов.

Поэтому при повышении эффективности использования МТА с учётом энергозатрат технологического процесса необходимо учитывать спектр факторов, влияющих на обе составляющие.

Суммарные энергозатраты при использовании МТА можно определить по формуле [6]

$$E_{МТА} = E_{ОПР} + E_{А}, \quad (62)$$

где $E_{МТА}$ – энергозатраты при использовании МТА, МДж/га;

$E_{ОПР}$ – основные прямые топливно-энергетические затраты, МДж/га;

E_A – энергозатраты, обусловленные несоблюдением оптимальных параметров и режимов работы агрегатов, МДж/га.

Основные прямые энергозатраты определяются по следующему соотношению [6]:

$$\bar{E}_{опр} = \frac{C_E \cdot \bar{G}_T}{N_{кр}}, \quad (63)$$

где $\bar{E}_{опр}$ – математическое ожидание основных прямых топливно-энергетических энергозатрат, МДж/га;

$C_E = (\alpha_T \cdot K_a) / (0,36\eta_T \cdot \tau)$ – коэффициент;

α_T – энергетический эквивалент дизельного топлива;

K_a – удельное тяговое сопротивление рабочих машин, кН/м;

η_T – тяговый КПД трактора на рабочем режиме;

τ – коэффициент использования времени смены;

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

$N_{кр}$ – математическое ожидание крюковой мощности трактора, кВт.

Для определения среднего значения E_A при выполнении данной технологической операции предлагается использовать выражение

$$\bar{E}_A = N \cdot C_{\pi i}, \quad (64)$$

где N – число дней, необходимых для выполнения объёма работ;

$C_{\pi i}$ – коэффициент потерь урожая, МДж/га·день;

$$C_{\Pi i} = Y \cdot \Delta y \cdot Q / 100, \quad (65)$$

где Y – планируемая урожайность, кг/га;

Δy – потери урожая в % на 1 день увеличения агросроков выполнения операций;

Q – энергоёмкость одного килограмма продукта, МДж/кг.

$$N = \frac{S_0}{M(\bar{W}_q) \cdot T_{см} \cdot n_{см}}, \quad (66)$$

где N – число дней, необходимых для выполнения объёма S_0 ;

S_0 – объем работы на данной операции, га;

$n_{см}$ – число смен в одном рабочем дне;

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

$T_{см}$ – продолжительность смены, ч.

Значения Δy устанавливаются с учётом условий природно-климатических зон, либо могут быть приняты по справочным данным.

Определение величины потерь энергии E_A с использованием выражения (64) необходимо осуществлять путем сравнения базового значения производительности W_b , которое соответствует номинальному режиму работы МТА и оптимального значения W_{opt} , которое соответствует оптимальному режиму работы агрегата с учетом негативного влияния колебаний внешней погрузки.

Базовое значение производительности МТА W_6 и оптимальное значение $W_{опт}$ необходимо в данном случае определять по выражению (67).

Для расчета математических ожиданий часовой производительности МТА в зависимости от переменной силы тяги трактора используется следующее выражение [6]:

$$M(WЧ) = C_{W2} [M(N_e)], \quad (67)$$

где $C_{W2} = 0,36\tau K_a^{-1}$;

K_a – удельное сопротивление агрегата, кН/м;

τ – степень использования времени работы агрегата;

$M(N_e)$ – математическое ожидание эффективной мощности на данной передаче, кВт (рассчитывается по формулам (20), (24)).

По формуле (67) находим $\bar{W}_ч^*$ – среднее значение часовой производительности, соответствующее оптимальному нагрузочному режиму двигателя, га/час ($W_{опт}$), и $\bar{W}_ч_n$ – среднее значение часовой производительности агрегата в области номинального режима (W_6).

Оптимальное и базовое значения топливно-энергетических затрат $\bar{E}_{опрОПТ}$ и $\bar{E}_{опрБАЗ}$ с учетом переменных внешних воздействий на агрегат рассчитывают по выражению (63).

Исходя из того что энергозатраты использования агрегатов определяются, прежде всего, расходом топлива и производительностью, которая зависит от эффективной мощности двигателя или тяговой мощности трактора, можно сказать, что задача нахождения оптимальных параметров и режимов работы МТА является двухкритериальной. Иначе говоря, рассматривается

многокритериальная оптимизация по двум ведущим и в то же время противоречивым критериям. Целевые функции поставленной оптимизационной задачи, определяющие характер и количество критериев, могут быть представлены в виде $Y = f(x)$, где x – входные воздействия на агрегат, Y – выходные параметры агрегата.

Эволюционные алгоритмы (ЭА), предложенные впервые для решения задач адаптации, в дальнейшем интенсивно развивались как методы решения сложных задач оптимизации. Генетические алгоритмы (ГА) представляют собой семейство ЭА, имеющих общую схему. На сегодняшний день ГА доказали свою конкурентоспособность при решении многих NP-трудных задач поиска и оптимизации и особенно в практических приложениях, где математические модели имеют сложную структуру и применение классических методов невозможно.

В основе большинства концепций искусственного интеллекта лежит богатое разнообразие природных явлений. Один из примеров – искусственные нейронные сети, основная идея которых основывается на функционировании нейронов мозга. ГА являются направлением более общей теории ЭА, основанной на следующем принципе: «каждый биологический вид целенаправленно развивается и изменяется для того, чтобы наилучшим образом приспособиться к окружающей среде».

ЭА базируются на коллективном обучающем процессе внутри популяции индивидуумов, каждый из которых представляет собой поисковую точку в пространстве допустимых решений данной задачи. Популяция случайно инициализируется и затем охватывает лучшие регионы поискового пространства посредством случайных процессов селекции, мутации и рекомбинации. Окружающая среда представляет качественную информацию (степень пригодности) о поисковых точках (индивидуумах), а процесс селекции отбирает тех

индивидуумов, у которых значение пригодности выше. Отобранные потомки являются, в свою очередь, родителями в следующем поколении. Механизм рекомбинации перемешивает генетическую информацию родителей (тем самым рождается один или несколько потомков), и наконец, механизм мутации способствует в некоторой степени обновлению генетической информации потомков.

В 1975 г. вышла основополагающая книга Дж. Холланда «Адаптация в естественных и искусственных системах», в которой был предложен первый генетический алгоритм. Термин «генетические алгоритмы» ввел в 1975 г. Д. Голдберг. Его книга содержит детальное обсуждение как теоретических аспектов ГА, так и возможных областей их применения:

- искусственная жизнь;
- автоматическое обучение;
- извлечение данных (знаний);
- инженерное проектирование;
- планирование и управление;
- моделирование, идентификация;
- численная и комбинаторная оптимизация.

Итак, ГА базируются на теоретических достижениях синтетической теории эволюции, учитывающей микробиологические механизмы наследования признаков в природных и искусственных популяциях организмов, а также на накопленном человечеством опыте в селекции животных и растений.

Методологическая основа ГА зиждется на гипотезе селекции, которая в самом общем виде может быть сформулирована так: чем выше приспособленность особи, тем выше вероятность того, что в

потомстве, полученном с ее участием, признаки, определяющие приспособленность, будут выражены еще сильнее.

Таким образом, ГА заимствуют из биологии:

- понятийный аппарат;
- идею коллективного поиска экстремума при помощи популяции особей;
- способы представления генетической информации;
- способы передачи генетической информации в череде поколений (генетические операторы);
- идею о преимущественном размножении наиболее приспособленных особей.

Представление решений в ГА

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

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

$$\chi(X) \rightarrow \underset{X \in B_{2^n}}{opt}, \text{ где } \chi : B_{2^n} \rightarrow R^1. \quad (68)$$

К задаче (68) сводятся практически любые задачи с дискретными переменными (возможно выраженные в разных шкалах), а также задачи с непрерывными переменными (заменяя непрерывные переменные дискретными с заданной точностью). Наиболее часто используется стандартное бинарное кодирование и бинарные коды Грея.

Общая схема ГА

В общем виде работу генетического алгоритма можно представить следующим образом:

1. Инициализируется случайным образом популяция решений.
2. С помощью оператора селекции выбирается часть популяции (родителей) для порождения потомков.
3. Применяется оператор скрещивания.
4. Новые решения (потомки) подвергаются мутации.
5. Формируется новая популяция: выбираются решения из родителей и потомков.
6. Повторяются пункты 2–5, пока не выполнится условие остановки.

Инициализация

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.

Селекция

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. Таким образом, 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, 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):

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

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

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 $f(X^i) \leq f(X^j)$.

$$\text{Тогда } P(X^i) = \frac{R_i}{\sum_{k=1}^r R_k} = \frac{i}{\sum_{k=1}^r k} = \frac{2i}{r(r+1)}, \text{ где } \sum_{j=1}^r P(X^j) = 1.$$

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.

Скрещивание

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 (рисунок 3.1).

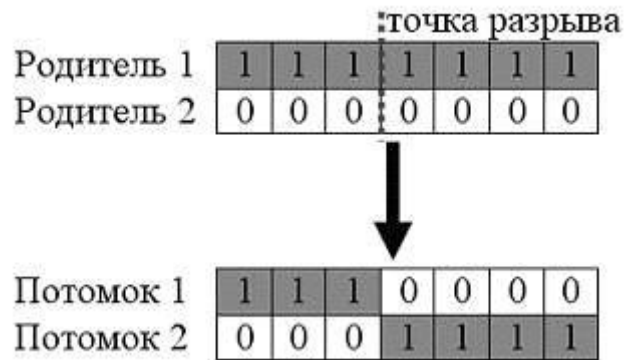


Рисунок 3.1 – Одноточечное скрещивание

При двухточечном скрещивании хромосома как бы замыкается в кольцо, выбираются 2 точки разрыва, родители обмениваются частями (рисунок 3.2).

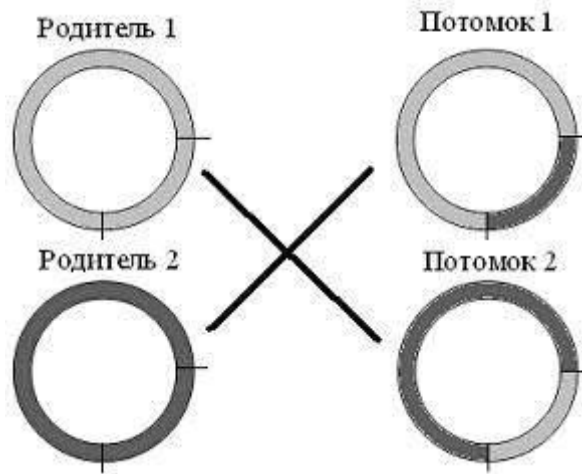


Рисунок 3.2 – Двухточечное скрещивание

При равномерном скрещивании потомок может унаследовать с равной вероятностью гены любого из родителей (рисунок 3.3).

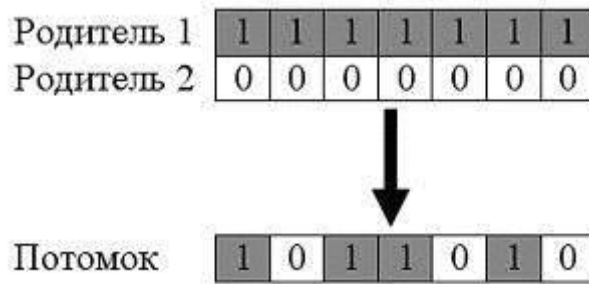


Рисунок 3.3 – Равномерное скрещивание

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

Мутация

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 равным $p_m = \frac{1}{n}$, 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 (рисунок 3.4).

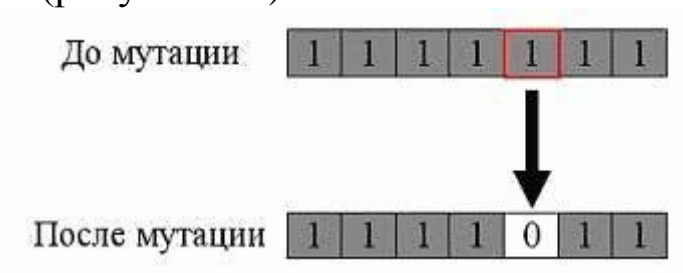


Рисунок 3.4 – Пример мутации в ГА

Пригодность индивидов (*fitness-функция*)

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

Преимущества ГА:

- 1) не требуется предположений о пространстве решений;
- 2) применимость на широком классе задач;
- 3) низкие затраты на разработку и применение;
- 4) легко включать другие методы;
- 5) решения легко поддаются интерпретации (в отличие от нейросетей);
- 6) возможно использование решения, предложенного пользователем;
- 7) обеспечивает большое количество альтернативных решений.

Недостатки ГА:

- 1) нет гарантии получения решения за конечное время;
- 2) слабое теоретическое обоснование;
- 3) возможно понадобится настройка большого количества параметров;

4) высокие вычислительные затраты, то есть невысокая скорость работы.

На основе общего эволюционного алгоритма и его составляющих многокритериальных генетических алгоритмов (ГА) разработан ряд методов решения оптимизационных задач. Одним из наиболее распространенных является метод VEGA – Vector Evaluted Genetic Algorithm [6].

Метод VEGA предусматривает расширение традиционного ГА за счет использования векторных оценок степени пригодности индивидуумов (решений задачи) и возможности параллельной оценки популяций (множества решений) по каждому из критериев в отдельности. Таким образом осуществляется одновременная оптимизация по всем целевым функциям.

Метод VEGA относится к методам параллельных популяций множества решений задачи, отобранных по каждому из частных критериев, то есть селекция или выбор наилучшего решения в соответствии с его пригодностью (соответствие критерию) производится для каждого критерия в отдельности.

Этап селекции в данном ГА протекает таким образом, что в каждом поколении (множество текущих значений функции) создается некоторое количество подпопуляций с помощью пропорциональной селекции (повторного использования хороших решений) для каждой целевой функции. То есть в задаче с K критериями создается K подпопуляций размером N/K , где N – размер всей популяции исходя из числа целевых функций. Далее подпопуляции смешиваются для получения новой популяции размером N , после чего ГА использует операторы мутации (поиска наилучших решений) и рекомбинации (скрещивания индивидуумов). Под скрещиванием понимается выбор наилучшего решения.

Механизм селекции и назначения пригодности в методе VEGA схематически выглядит следующим образом (рисунок 3.5) [6].

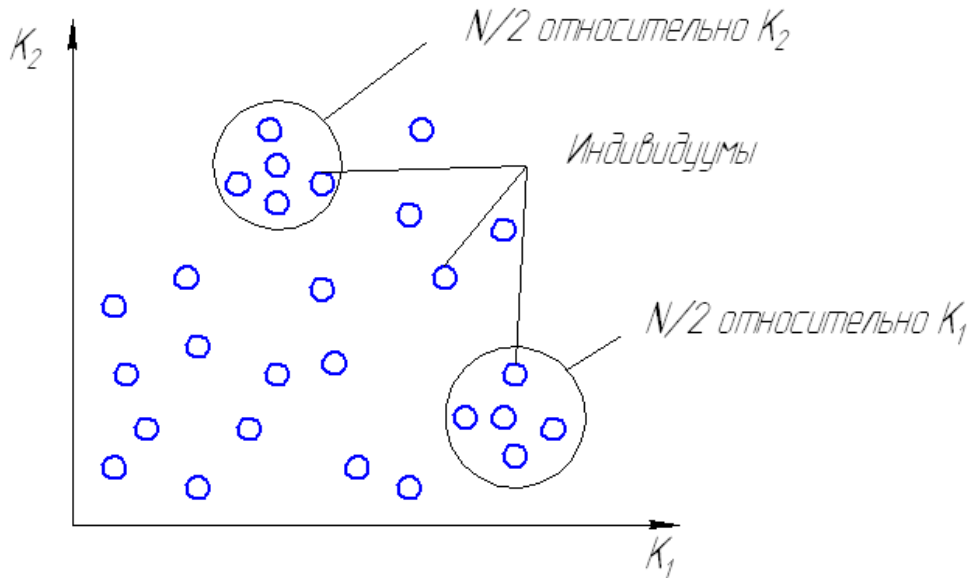


Рисунок 3.5 – Пропорциональная селекция в методе VEGA: K_1 и K_2 – критерии

На рисунке 3.5 представлена двухкритериальная задача. Для каждого из критериев создается подпопуляция размером $N/2$, куда индивидуумы отбираются с помощью пропорциональной селекции относительно пригодности по каждому критерию в отдельности. Затем подпопуляции смешиваются для получения общей популяции размером N . Далее осуществляются этапы скрещивания и мутации. Данный ГА может использовать принцип паретооптимальности (использование множества Парето) при решении многокритериальной задачи.

Решение $x \in D$ называется эффективным (паретовским, не улучшаемым), если в множестве допустимых альтернатив – решений D не существует решения, которое по целевым функциям было бы не хуже чем x , и по одной целевой функции было бы лучше чем x .

Структура применяемого ГА, построенного на основе алгоритма VEGA, состоит из следующих основных операторов.

Инициализация. На шаге инициализации задаются параметры алгоритма: длина хромосомы (представление решения задачи в виде бинарной строки), размер популяции и др. Если априорные сведения

о пространстве поиска отсутствуют, начальная популяция генерируется случайным образом.

Как правило, оптимизируемая функция представлена в форме для работы с десятичными числами. Поскольку ГА работает с двоичными строками, необходимо каждый набор значений переменных, представляющих одно решение, преобразовать в виде двоичного кода. Для этого на первом этапе работы ГА необходимо произвести следующие действия:

- определить m – число переменных в оптимизируемой функции;
- задать области допустимых значений для переменных;
- задать для каждой переменной точность, с которой будет выполняться поиск;
- вычислить необходимую длину бинарной строки для каждой переменной;
- вычислить общую длину генотипа (генотип – множество решений задачи в виде бинарной строки).

Вычислить длину бинарного кода для i -й переменной, заданной на интервале $(a_i; b_i)$, с точностью ω_i можно, определив мощность пространства поиска по формуле

$$interval_i = \frac{b_i - a_i}{\omega_i}. \quad (69)$$

Длиной бинарного кода будет такое минимальное число n_i , что $2^{n_i} \geq interval_i$. Таким образом, длина генотипа одного индивида n будет равна

$$n = \sum_i^m n_i. \quad (70)$$

Для инициализации начальной популяции нужно определить размер популяции (N), то есть множество индивидов, обрабатываемых в одной итерации работы ГА (поколении). Инициализация начальной популяции производится случайно, то есть каждый символ из строки-кода для каждого индивида выбирается случайным образом (числами 0 или 1).

Оценка индивидов. Оценку индивидов можно разделить на два подэтапа: вычисление целевой функции и вычисление функции пригодности.

Вычисление целевой функции. Поскольку в алгоритме решения представлены двоичными строками – генотипом, для оценки индивида необходимо перейти от генотипа к фенотипу (решению задачи на вещественных строках). Для этого требуется сначала создать какую-либо структуру или массив, где будет храниться фенотип.

На первом шаге необходимо из генотипа выделить участки, в которых хранятся данные о каждой переменной в отдельности. Это нетрудно сделать, имея сохраненные длины кода переменных и зная, в каком порядке они записаны в генотипе.

Определив участки генотипа, в которых хранится информация о каждой переменной, можно произвести декодирование каждой переменной. Как правило, в описании работы генетического алгоритма для простоты указывается, что переменные в генотипе записаны в виде простого двоичного числа. Однако в реальности, при использовании простой двоичной кодировки, возникают ситуации, когда два соседних числа в десятичном виде отличаются большим числом разрядов в двоичном. Например, числа 3 и 4 в двоичном виде отличаются на 3 разряда: 011 и 100. Это часто приводит к тому, что ГА в процессе работы останавливается «в шаге» от оптимального решения, так как для перехода к нему требуется большое изменение двоичной строки. Избежать этой ситуации позволяет использование каких-либо других бинарных кодировок. В генетическом алгоритме хорошо показывает себя применение рефлексивного кодирования Грея или кода Грея.

Предположим, что в генотипе переменная изначально закодирована кодом Грея, перед нами встает задача декодирования ее в классическую двоичную систему исчисления. Сделать это можно по следующей формуле:

$$B_k = \bigoplus_{i=k}^N G_i, \quad (71)$$

где N – число бит в коде Грея; B_k – значение бита в двоичной системе исчисления; G_i – значение бита в коде Грея. Символ \oplus означает операцию «XOR» или «исключающее ИЛИ», так же иногда эта операция носит название «ЛИБО».

После перевода из кода Грея в двоичный код нужно произвести преобразование числа из двоичной системы исчисления в десятичную.

Следует понимать, что число, выраженное в генотипе, означает не значение переменной, а смещение относительно левой границы заданного интервала поиска, умноженное на точность поиска, то есть число d_i , полученное в результате преобразования, не есть значение переменной y , вычислить ее значение можно по формуле

$$y = a_i + d_i \cdot \omega_i, \quad (72)$$

где i – номер переменной y .

Вычислив фенотип всех индивидов в популяции, можно произвести вычисление значений целевой (оптимизируемой) функции.

При вычислении целевой функции необходимо проверять значение переменных фенотипа на нахождение их в заданном интервале поиска. В случае, если переменная выходит за границы области поиска, применяется штрафование такого индивида. Существует много различных штрафных функций: статические штрафы, динамические штрафы, «смертельные» и пр.

После вычисления значений целевой функции для всей популяции в первом поколении необходимо выбрать лучшего индивида и сохранить его генотип, а также значение целевой функции. В следующих поколениях нужно сравнивать каждого индивида с лучшим и в случае, если его значение лучше, производить перезапись лучшего индивида. Если не производить данную операцию, ГА будет множество раз находить и терять лучшее решение.

Вычисление функции пригодности. Для вычисления функции пригодности $fitness_k$ используются следующие формулы [6]:

- для задачи максимизации:

$$fitness_k = \begin{cases} \frac{f(x_k) - I^{min}}{I^{max} - I^{min}}, & \text{если } I^{max} \neq I^{min}; \\ 1, & \text{если } I^{max} = I^{min}. \end{cases} \quad (73)$$

где

$$I^{min} = \min_{x \in Y} f(x),$$

$$I^{max} = \max_{x \in Y} f(x);$$

Y – множество представленных индивидами значений целевой функции в текущем поколении; x – фенотип; $f(x_k)$ – значение целевой функции; $k = \overline{1, N}$;

- для задачи минимизации:

$$fitness_k = \begin{cases} \frac{I^{max} - f(x_k)}{I^{max} - I^{min}}, & \text{если } I^{max} \neq I^{min}; \\ 1, & \text{если } I^{max} = I^{min}. \end{cases} \quad (74)$$

$$k = \overline{1, N}.$$

Селекция. Селекция – оператор случайного выбора одного индивида из популяции. Оператор селекции основывается на значениях функции пригодности всех индивидов текущей популяции для использования выбранного индивида в операторе скрещивания. При этом вероятность выбора у индивидов с более высокой пригодностью выше, чем у индивидов с более низкой пригодностью. В рассматриваемом алгоритме используется пропорциональная селекция.

Пропорциональная селекция. Вероятность выбора элемента пропорциональна значению пригодности индивида. Данный вид селекции может работать только с неотрицательными значениями пригодности.

Пропорциональная селекция определяется формулой [6]

$$p_k = \frac{fitness_k}{\sum_{j=1}^N fitness_j}. \quad (75)$$

Например, пусть: $fitness = \{0,3; 1; 0,5; 0\}$. Тогда вероятности отбора индивидов для скрещивания будут:

$$p_1 = \frac{0,3}{0,3+1+0,5+0} \approx 0,17,$$

$$p_2 = \frac{1}{0,3+1+0,5+0} \approx 0,55,$$

$$p_3 = \frac{0,5}{0,3+1+0,5+0} \approx 0,28,$$

$$p_4 = \frac{0}{0,3+1+0,5+0} = 0.$$

Для выбора индивида необходимо случайно «бросить» число и выбрать индивида, на которого оно попало (рисунок 3.6).

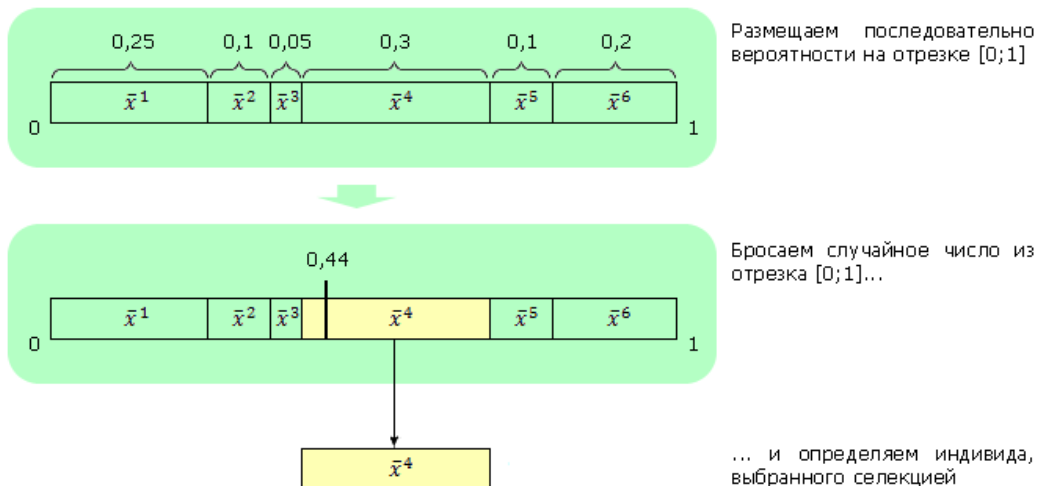


Рисунок 3.6 – Пропорциональная селекция

Реализовать данный алгоритм программно можно следующим образом:

- выбрать случайное число на отрезке от 0 до 1;
- последовательно складывать вероятности быть отобранным для каждого индивида, начиная с первого, до тех пор, пока сумма вероятностей не станет больше либо равной этому случайному числу. Итерация, на которой сумма вероятностей превысит выпавшее число, будет номером индивида, попавшего на скрещивание.

Скрещивание. Скрещивание (кроссовер) – оператор случайного формирования нового индивида из двух выбранных родителей (предыдущих решений задачи) с сохранением признаков обоих родителей. В качестве оператора скрещивания в разработанном алгоритме используется двухточечное скрещивание.

Двухточечное скрещивание. Пусть имеются два родителя (родительские хромосомы). В двух случайных местах происходят разрывы между двумя позициями генов (значений ячейки в двоичной форме записи переменной) в обеих хромосомах. После этого хромосомы обмениваются частями, в результате чего образуются два потомка (потомок – новое решение задачи с использованием данных о предыдущих решениях). Из них выбирается случайно один потомок, который и передается в качестве результата оператора скрещивания [6].

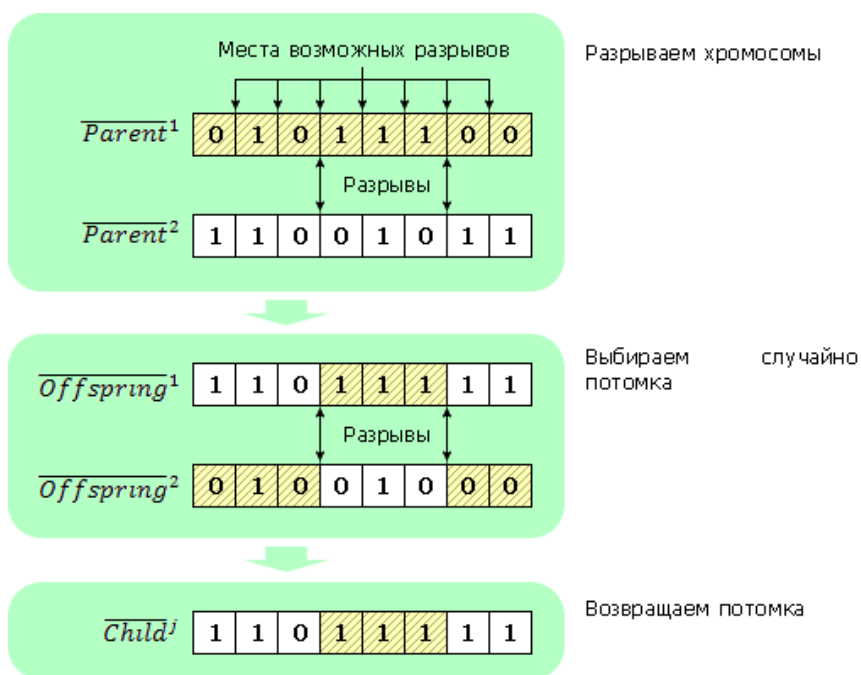


Рисунок 3.7 – Двухточечное скрещивание

Мутация. Мутация – оператор случайного изменения всех потомков из популяции. Цель данного оператора – не получить лучшее решение, а расширить многообразие рассматриваемых

индивидов. Обычно мутация предполагает незначительное изменение потомков. При выполнении оператора каждый ген каждого индивида с некоторой заданной вероятностью мутирует, то есть меняет свое значение на противоположное.

Обычно в генетическом алгоритме вероятность мутации выбирается из трех вариантов: слабая, средняя и сильная мутация.

$$p(mut) = \begin{cases} \frac{1}{3n}, & \text{если мутация слабая;} \\ \frac{1}{n}, & \text{если мутация средняя;} \\ \min\left(\frac{3}{n}, 1\right), & \text{если мутация сильная.} \end{cases} \quad (76)$$

n – длина вектора $x \in D$ бинарной задачи оптимизации.

Пример мутации одного из индивидов показан на рисунке 3.8 [6].

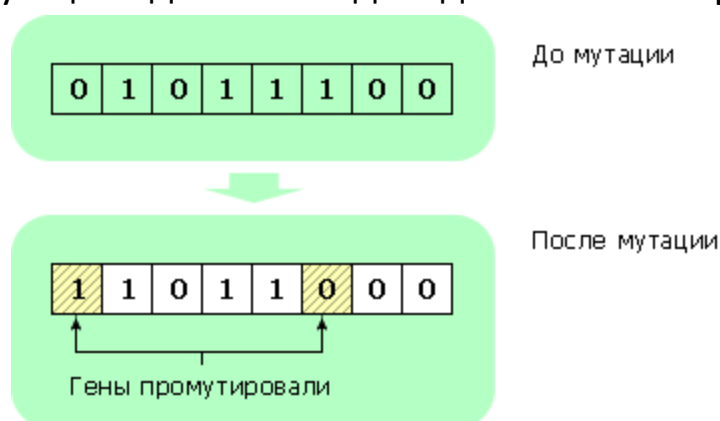


Рисунок 3.8 – Мутация

Формирование нового поколения. Формирование нового поколения – оператор формирования нового поколения из массива родителей и получившихся потомков с использованием уже известных значений функции пригодности как родителей, так и потомков.

Программное средство для многокритериальной оптимизации энергозатрат при использовании машинно-тракторных агрегатов

На основе многокритериального генетического алгоритма с использованием языка программирования С++ разработано программное средство оптимизации энергозатрат при использовании сельскохозяйственных агрегатов. Данное программное средство, основанное на решении двухкритериальной оптимизационной задачи паретодомирования, позволяет:

- определять оптимальные параметры стендовой характеристики дизеля;
- определять оптимальные параметры тяговой характеристики трактора;
- рассчитывать уровень энергозатрат при работе МТА на режиме рабочего хода с учетом установленных оптимальных характеристик двигателя и трактора.

В качестве исходных данных используются конструктивные параметры стендовой и тяговой характеристик современных сельскохозяйственных тракторов, входящих в состав МТА для выполнения различных технологических операций по возделыванию сельскохозяйственных культур.

Порядок работы с программой

После запуска программы открывается окно, представленное на рисунке 3.9.

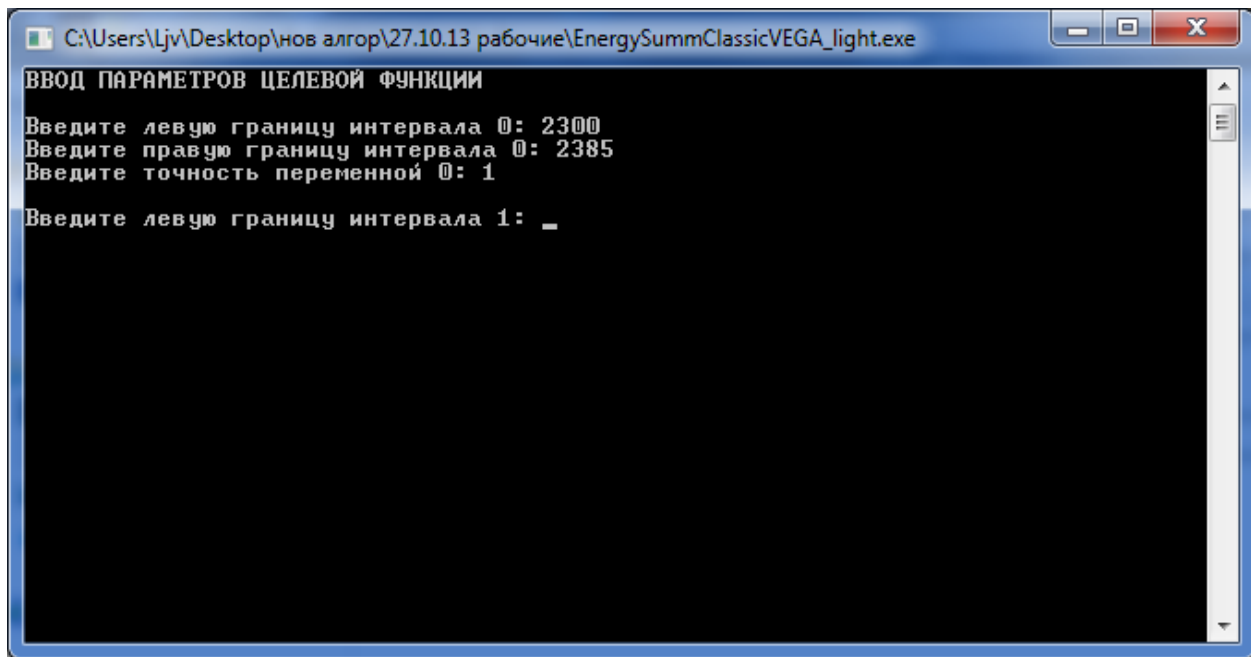


Рисунок 3.9 – Окно для ввода области определения переменной n_x

В данном окне, в строке «введите левую границу интервала 0», вводится левая граница переменной n_x (обороты холостого хода двигателя). Далее, с учетом области определения переменной, вводится правая граница переменной n_x (рисунок 3.9). После ввода области определения переменной n_x в строке «введите точность переменной 0», задается точность переменной, например, 1 (рисунок 3.9).

Аналогично переменной n_x вводятся последовательно области значений и точность измерения остальных переменных целевых функций оптимизационного алгоритма (рисунки 3.10–3.18).

Интервал 1 – n_H (номинальные обороты двигателя).

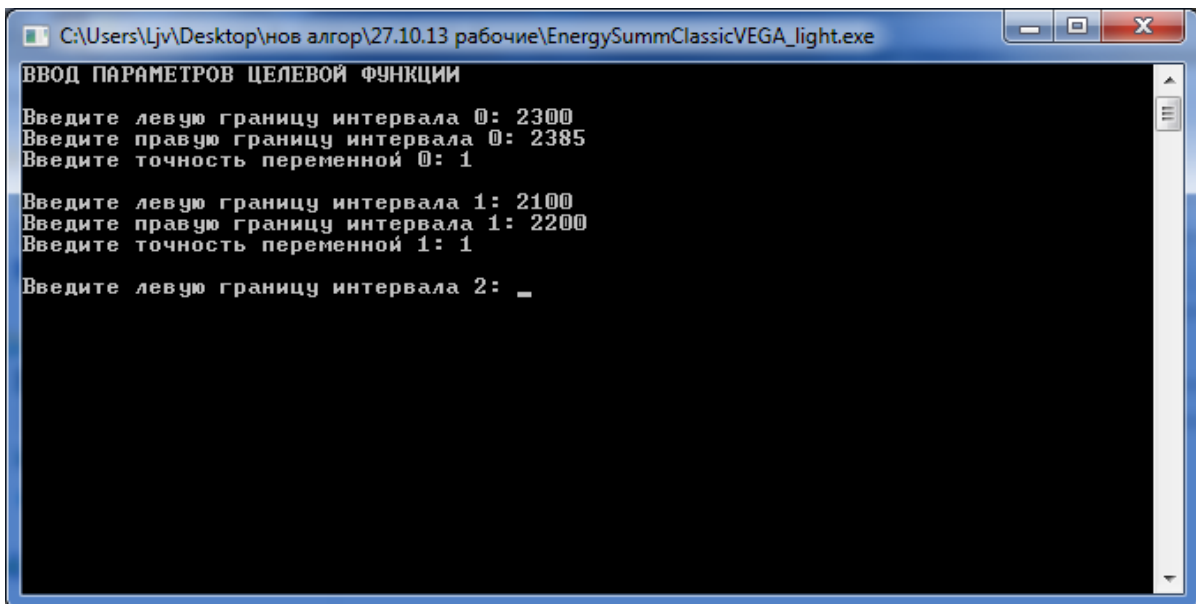


Рисунок 3.10 – Окно для ввода области определения переменной n_H

Интервал 2 – n_{min} (минимально устойчивые обороты двигателя).

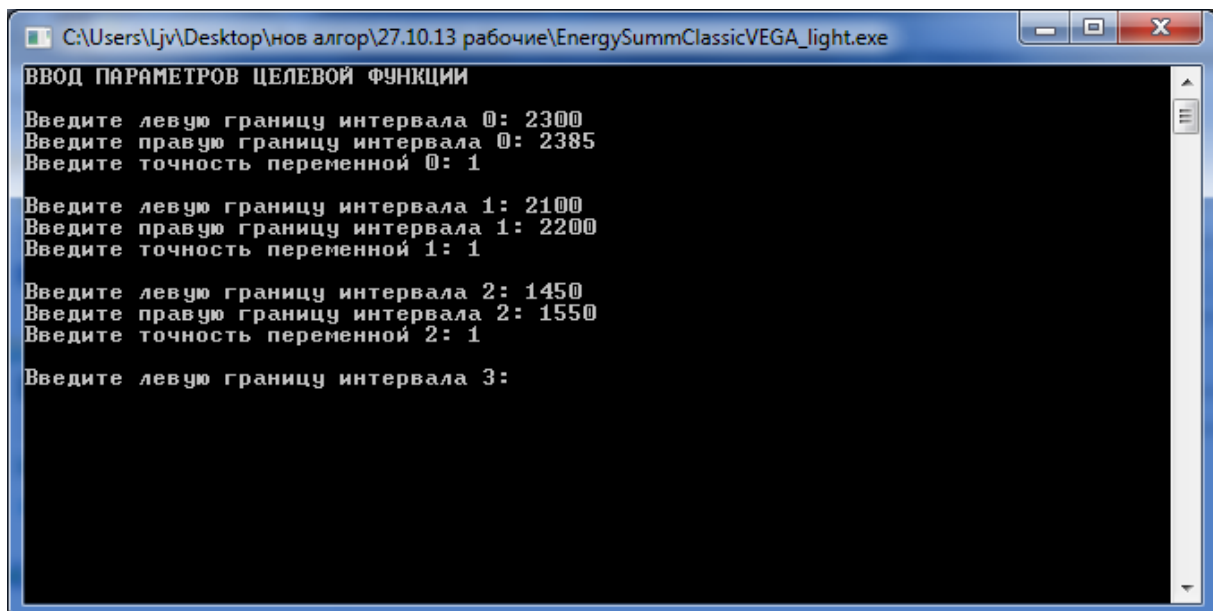


Рисунок 3.11 – Окно для ввода области определения переменной n_{min}

Интервал 3 – M_H (номинальный крутящий момент на валу двигателя).

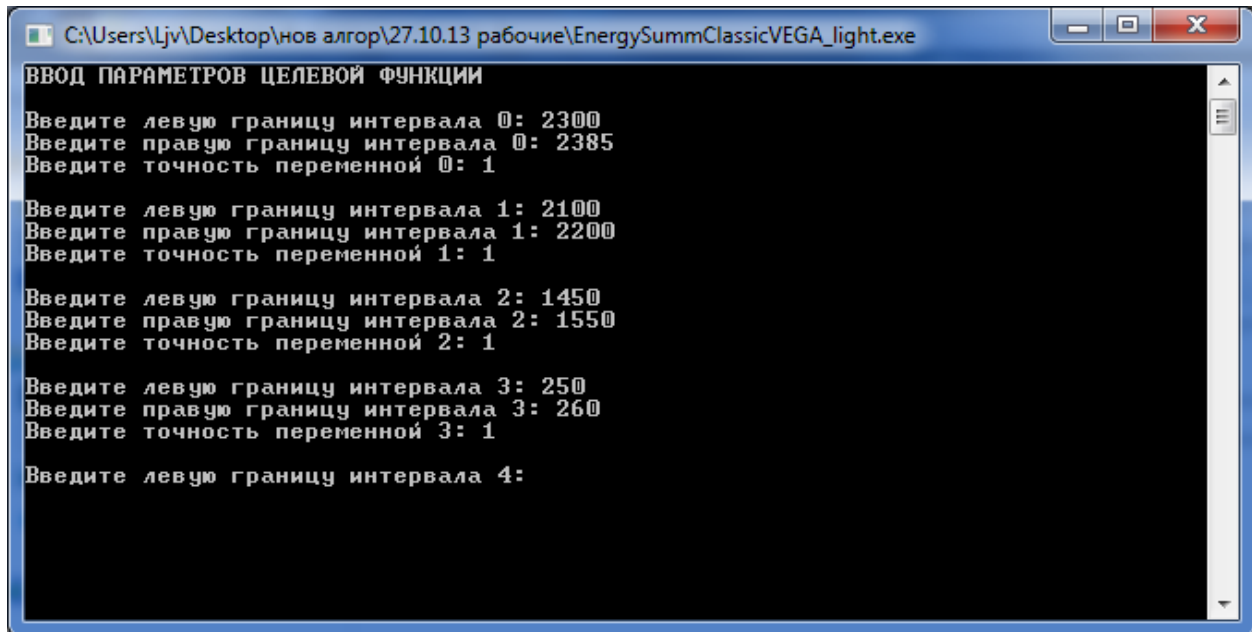


Рисунок 3.12 – Окно для ввода области определения переменной M_H

Интервал 4 – M_K (текущие средние значения крутящего момента).

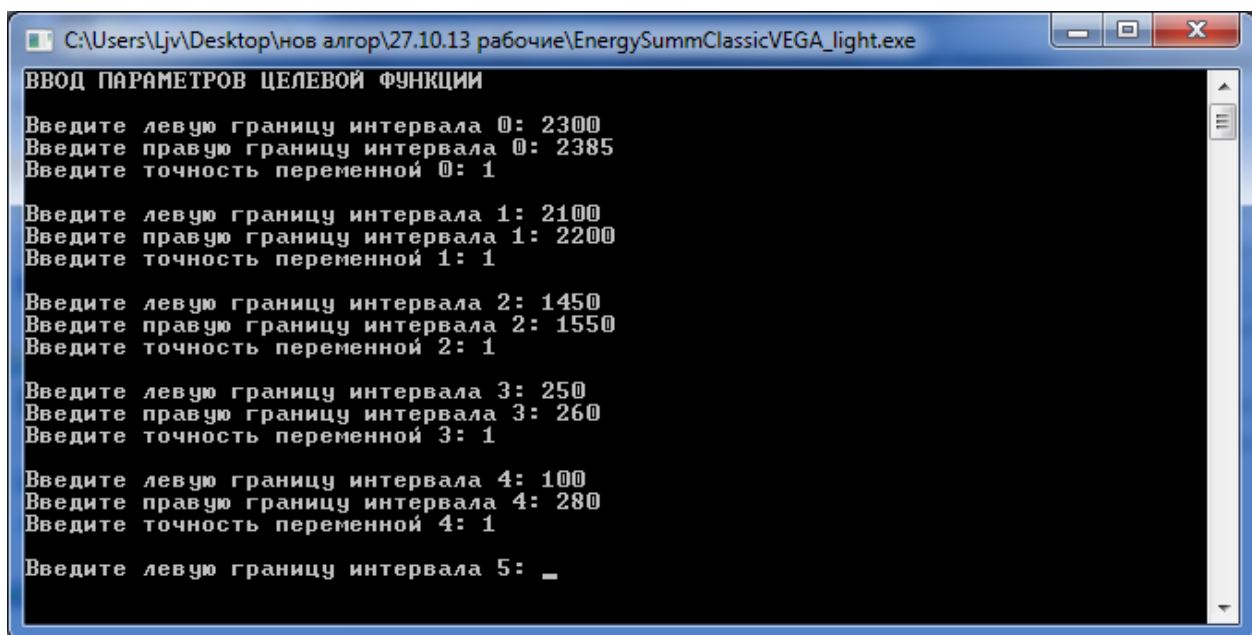


Рисунок 3.13 – Окно для ввода области определения переменной M_k

Интервал 5 – k (коэффициент приспособляемости по крутящему моменту).

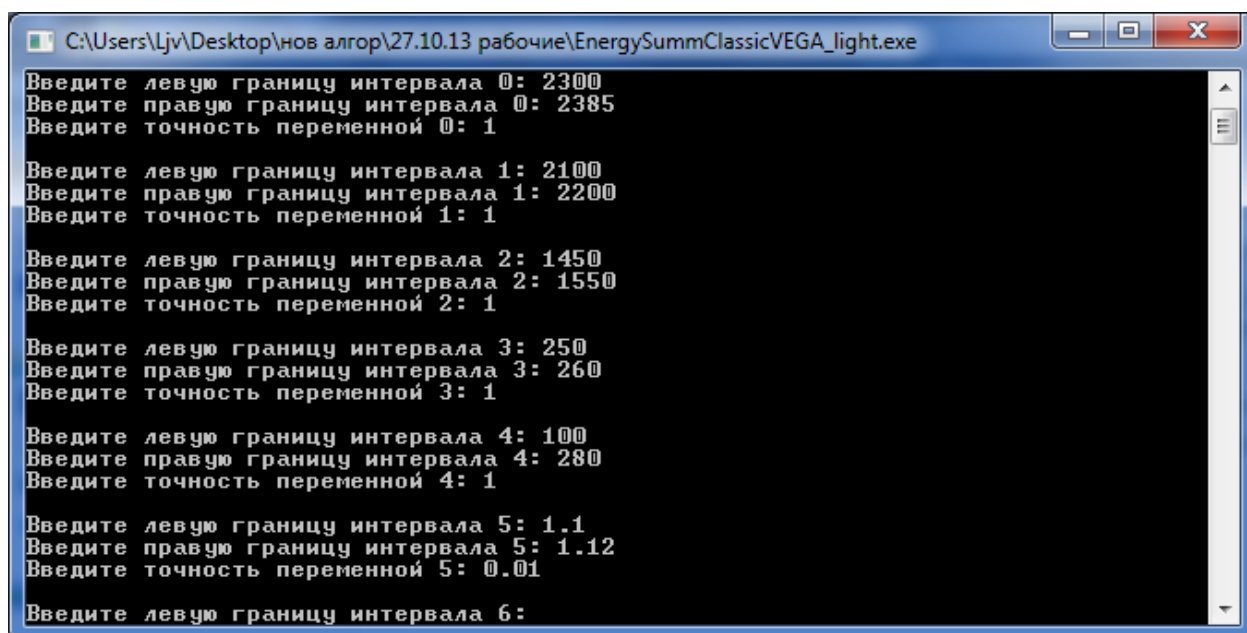


Рисунок 3.14 – Окно для ввода области определения переменной k

Интервал 6 – ν_M (коэффициент вариации момента M_k).

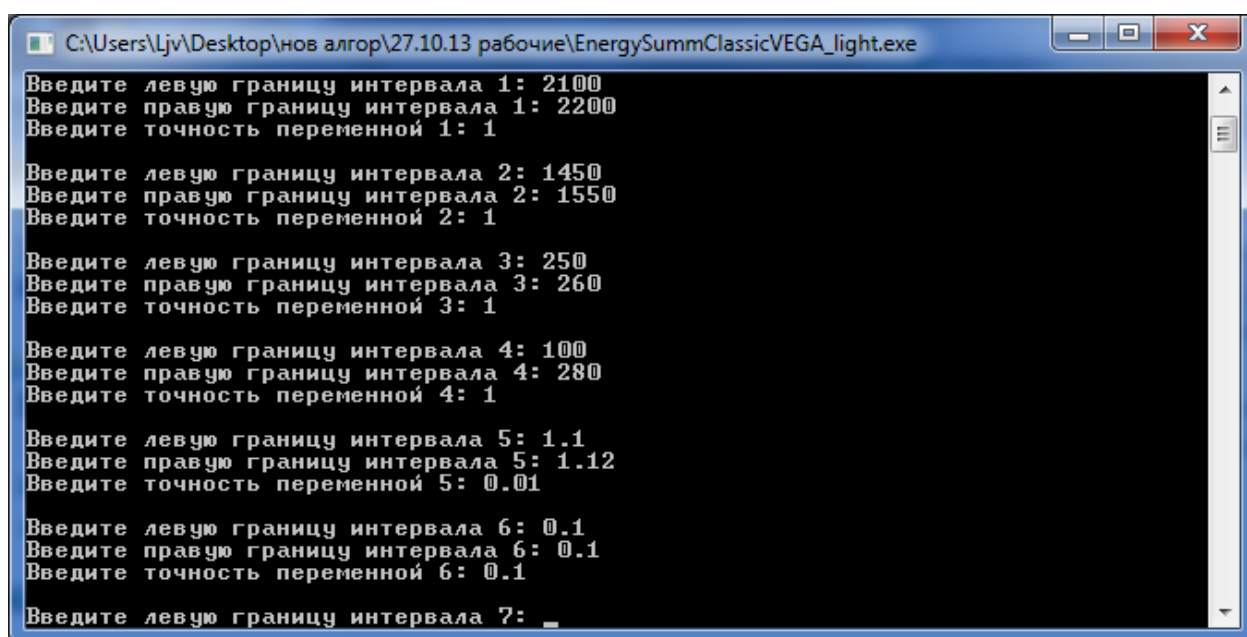


Рисунок 3.15 – Окно для ввода области определения переменной ν_M

Интервал 7 – $G_{ТХ}$ (часовой расход топлива на оборотах холостого хода двигателя).

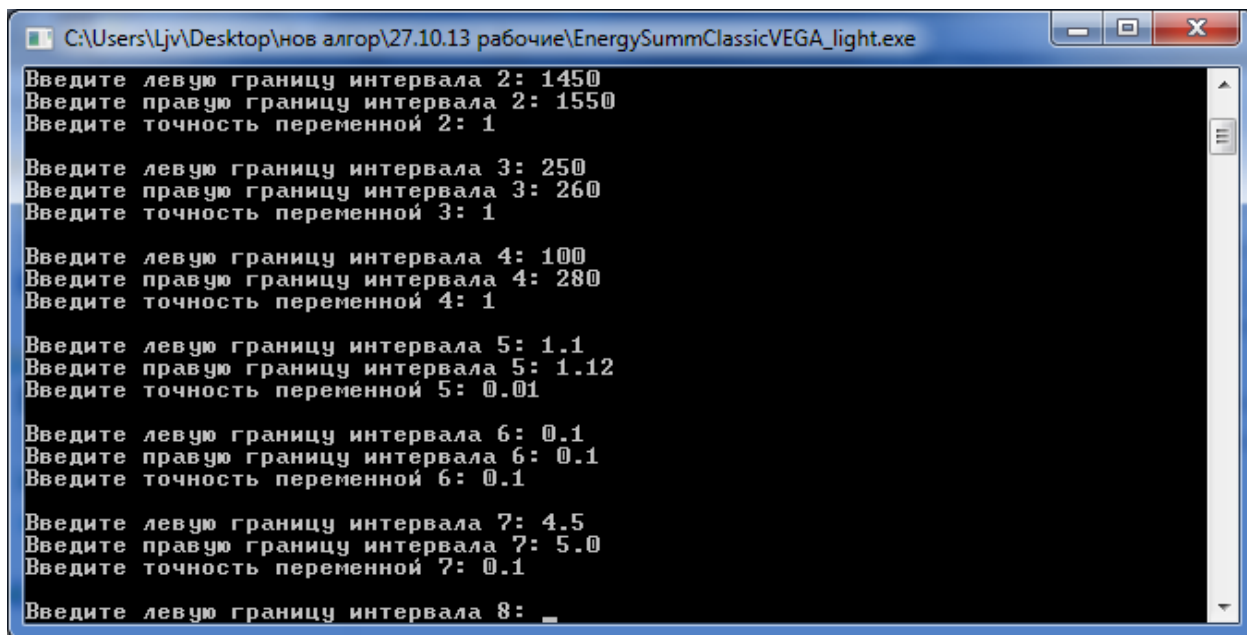


Рисунок 3.16 – Окно для ввода области определения переменной $G_{ТХ}$

Интервал 8 – $G_{ТН}$ (часовой расход топлива при номинальном крутящем моменте двигателя M_H).

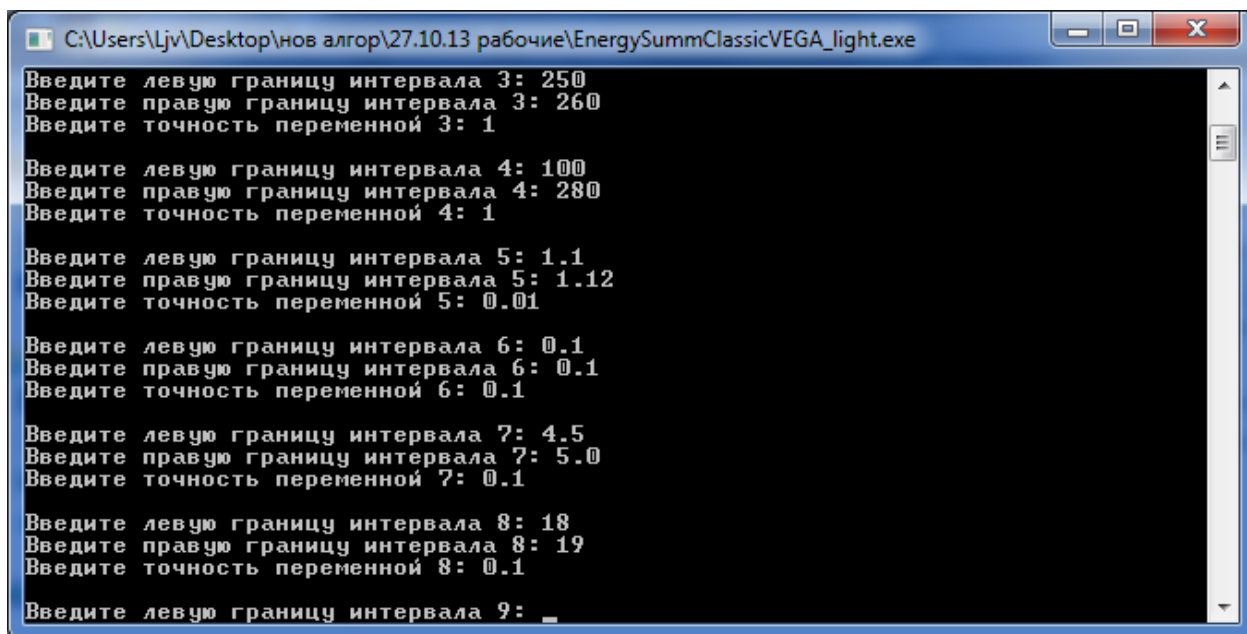


Рисунок 3.17 – Окно для ввода области определения переменной $G_{ТН}$

Интервал 9 – $k_{об}$ (коэффициент приспособляемости двигателя по оборотам).

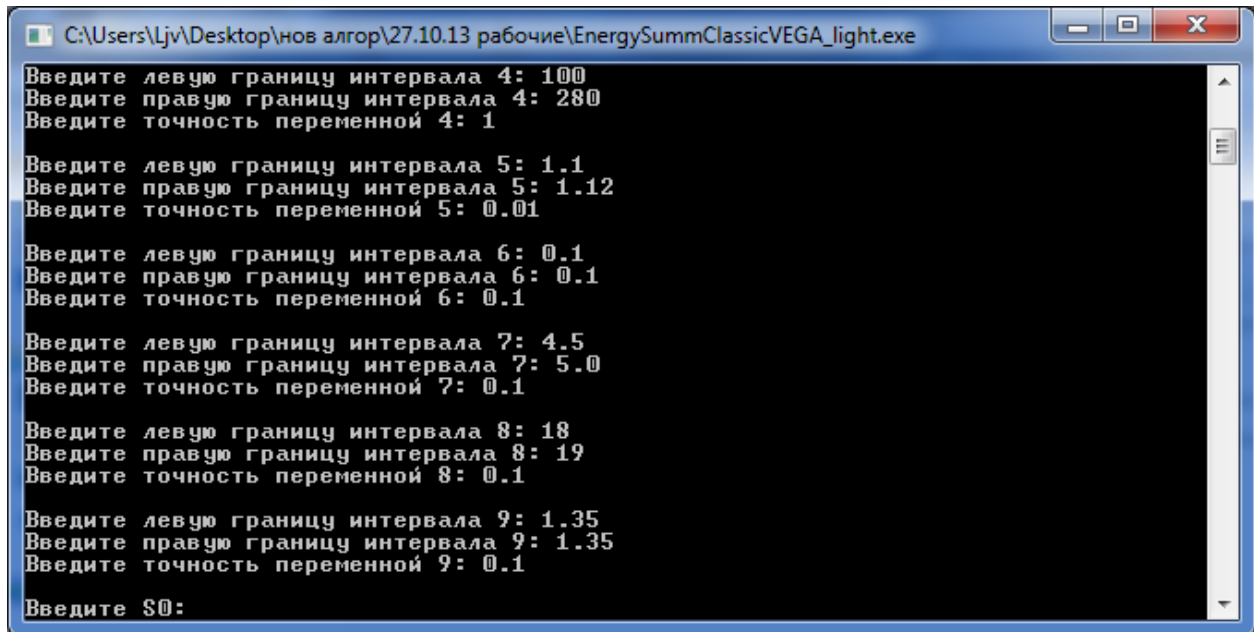


Рисунок 3.18 – Окно для ввода области определения переменной $k_{об}$

$k_{об}$ – коэффициент приспособляемости двигателя по оборотам, для вновь проектируемых двигателей рекомендуется принимать $k_{об} = 1,25–1,35$.

После ввода значений всех переменных задачи производится настройка параметров генетического алгоритма (рисунок 3.19).

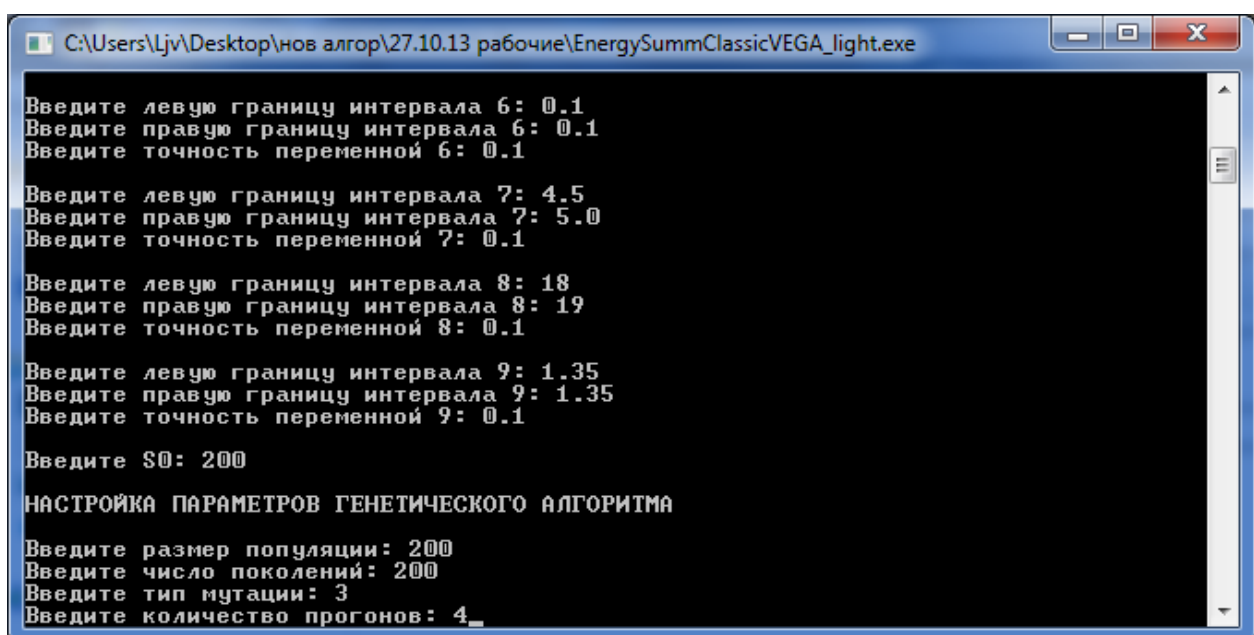


Рисунок 3.19 – Выбор параметров алгоритма

Размер популяции означает, сколько индивидов будет в популяции, с помощью которой осуществляется поиск; желательно ставить от 200 до 500 особей; слишком маленькая популяция может дать слабый результат, слишком большая – не дает точности, но значительно замедляет работу.

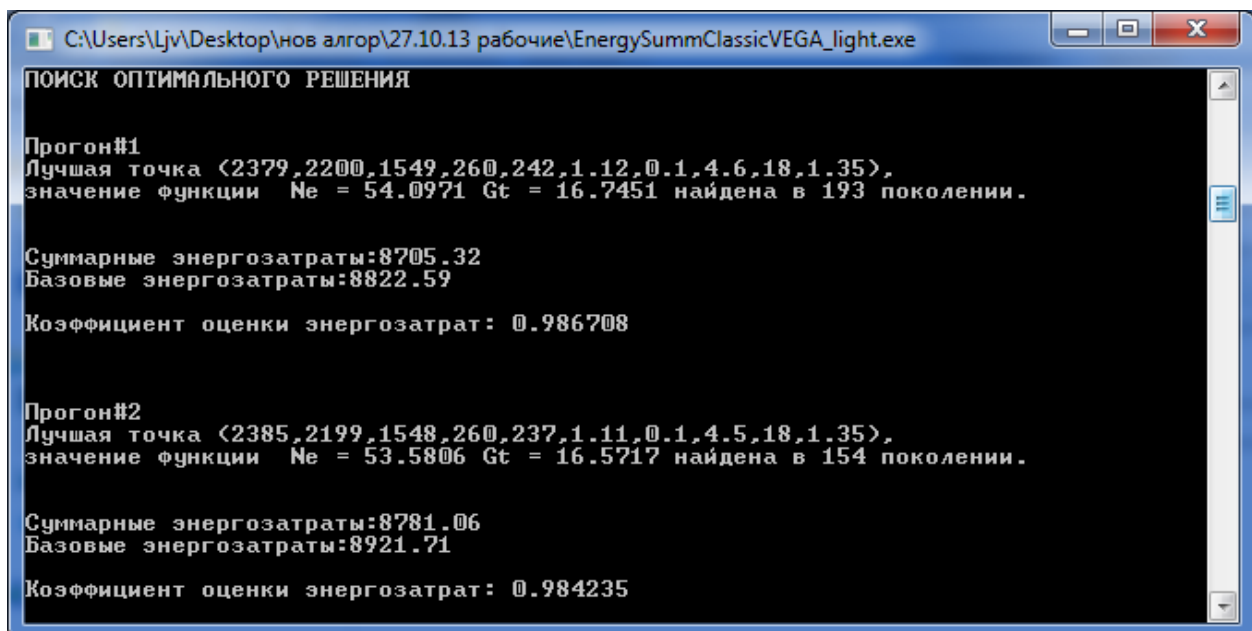
Выбор числа поколений – рекомендуются значения от 100 до 1000.

Выбор типа мутации (вероятность мутации гена в хромосоме) надо вводить число от 1 до 3, где 1 – низкая мутация; 2 – средняя мутация; 3 – высокая мутация (желательно пользоваться высокой).

Выбор количества прогонов алгоритма (количество запусков алгоритма с заданными выше параметрами).

Результаты работы алгоритма

Результаты работы генетического алгоритма представлены на рисунках 3.20, 3.21.



```
ПОИСК ОПТИМАЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Прогон#1
Лучшая точка <2379,2200,1549,260,242,1.12,0.1,4.6,18,1.35>,
значение функции Ne = 54.0971 Gt = 16.7451 найдена в 193 поколении.

Суммарные энергозатраты:8705.32
Базовые энергозатраты:8822.59

Коэффициент оценки энергозатрат: 0.986708

Прогон#2
Лучшая точка <2385,2199,1548,260,237,1.11,0.1,4.5,18,1.35>,
значение функции Ne = 53.5806 Gt = 16.5717 найдена в 154 поколении.

Суммарные энергозатраты:8781.06
Базовые энергозатраты:8921.71

Коэффициент оценки энергозатрат: 0.984235
```

Рисунок 3.20 – Результаты работы алгоритма

```

C:\Users\Ljv\Desktop\нов алгор\27.10.13 рабочие\EnergySummClassicVEGA_light.exe

Прогон#3
Лучшая точка <2385,2200,1550,260,238,1.12,0.1,4.5,18,1.35>,
значение функции Ne = 53.817 Gt = 16.6238 найдена в 151 поколении.

Суммарные энергозатраты:8744.92
Базовые энергозатраты:8819.77

Коэффициент оценки энергозатрат: 0.991513

Прогон#4
Лучшая точка <2382,2200,1549,260,243,1.12,0.1,4.5,18,1.35>,
значение функции Ne = 54.154 Gt = 16.7617 найдена в 199 поколении.

Суммарные энергозатраты:8696.96
Базовые энергозатраты:8821.93

Коэффициент оценки энергозатрат: 0.985834

```

Рисунок 3.21 – Результаты работы алгоритма

Расчеты проведены на примере тракторов тягового класса 14 кН. По результатам каждого прогона алгоритма программа выдает лучшую точку относительно двух критериев (максимум эффективной мощности двигателя N_e и, соответственно, производительности агрегата W_d ; минимум часового расхода топлива G_T). Лучшая точка содержит оптимальные значения переменных $n_x, n_n, n_{min}, M_n, M_k, k, G_{mx}, k_{об}$. Исходя из оптимальных значений переменных (оптимальных G_{mn} , параметров стендовой характеристики дизеля) и значения коэффициента вариации v_M с помощью целевых функций $N_e = f(M_k)$ и $G_T = f(M_k)$ определяются оптимальные значения мощности N_e и часового расхода топлива G_T с учетом вероятностной нагрузки и соответствующие им оптимальные значения коэффициента $\lambda^* \bar{E}_{MTA}$ – обобщающего критерия оценки влияния оптимальных параметров и режимов работы МТА на энергозатраты технологического процесса.

Алгоритмы оптимизации параметров МТА с трактором, имеющим двигатель постоянной мощности

Представленные программные системы генетических алгоритмов оптимизации параметров МТА используют данные двигателей и тракторов с классической регуляторной характеристикой.

Программные средства на основе ГА для современных тракторов с двигателем постоянной мощности основаны на применении в качестве переменных задачи оптимизации параметров характеристик двигателя, имеющих участок постоянной мощности N_e .

Целевыми функциями задачи, определяющими зависимость входных и выходных показателей системы, характер и количество критериев, также являются зависимости $N_e = f(M_k)$.

Структура программы оптимизации параметров стендовой характеристики трактора с двигателем постоянной мощности аналогична описанной ранее. Порядок работы с программой по расчету параметров стендовой характеристики двигателя трактора представлен на рисунках 3.22–3.34.

Список переменных оптимизационной задачи с использованием стендовой характеристики двигателя постоянной мощности.

0: n_x – обороты холостого хода, мин^{-1} ;

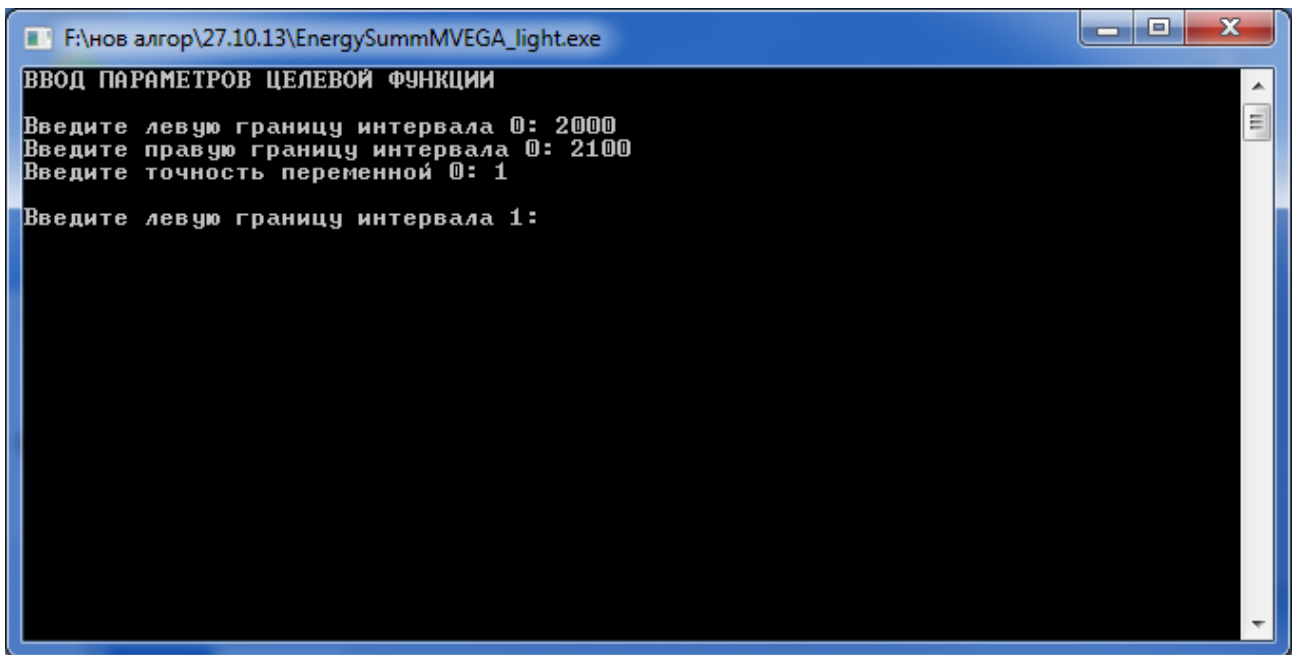


Рисунок 3.22 – Окно ввода переменной n_x

1 : n_{pot} – номинальные обороты вала дизеля, $мин^{-1}$.

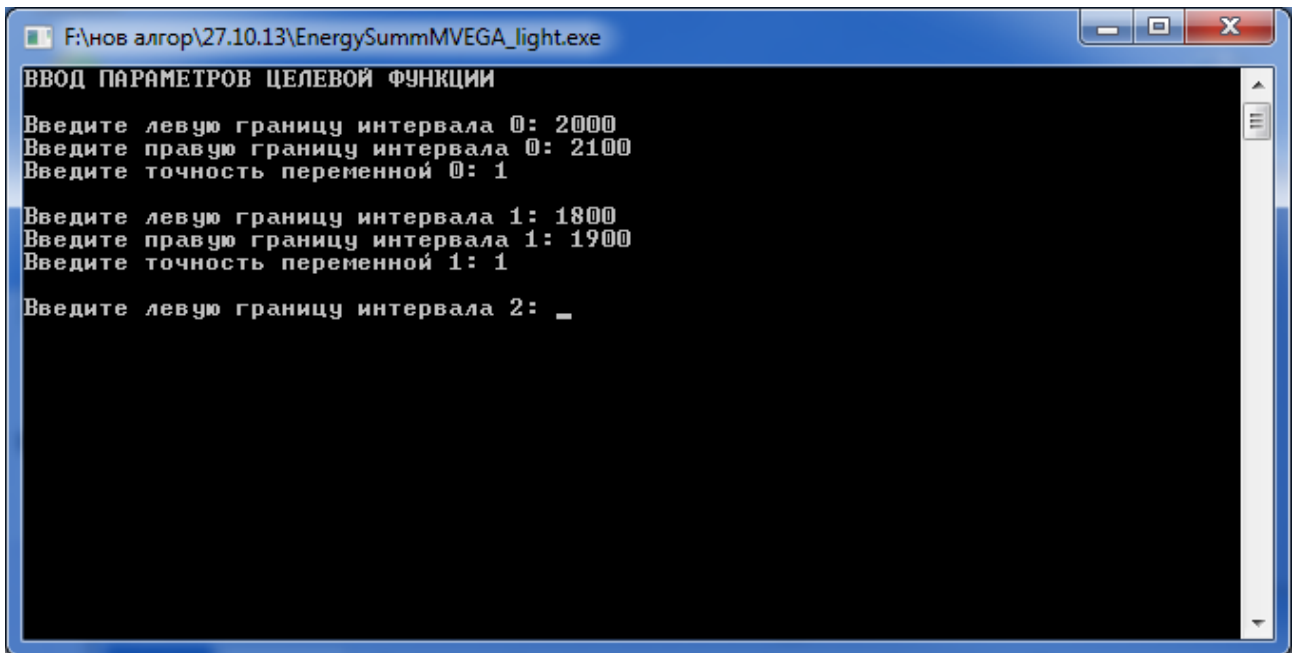


Рисунок 3.23 – Окно ввода переменной n_{pot}

2: n_p – частота вращения вала дизеля при предельном крутящем моменте, мин^{-1} .

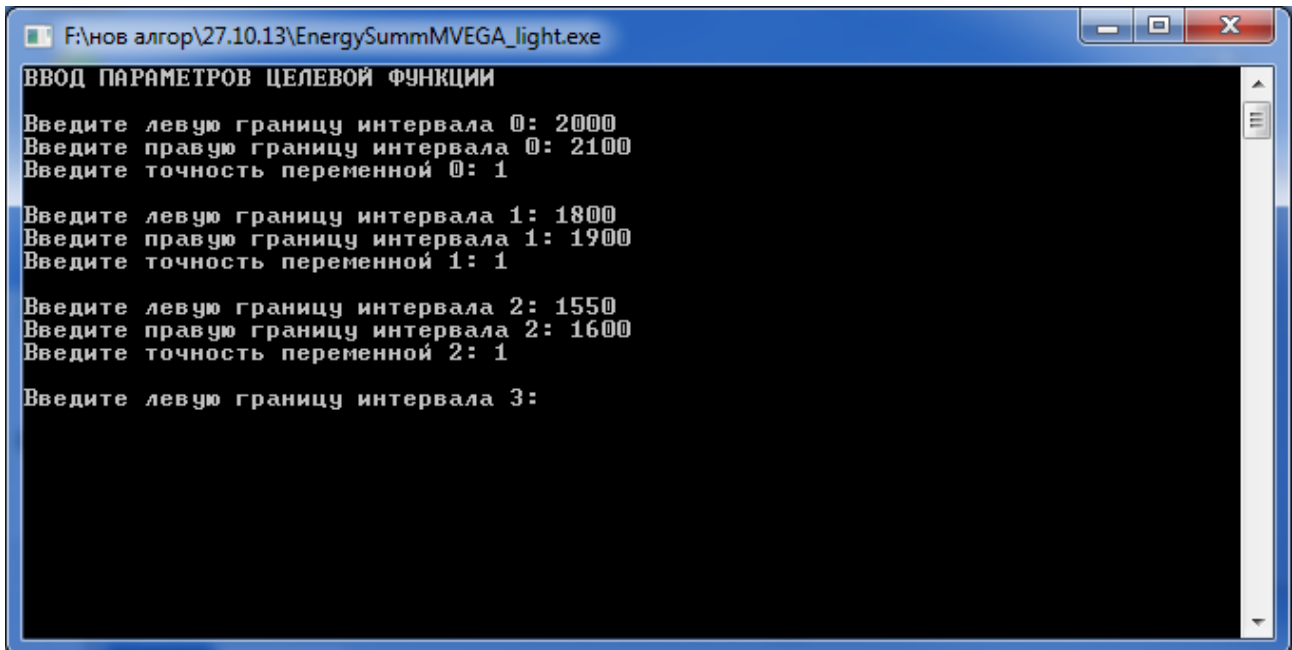


Рисунок 3.24 – Окно ввода переменной n_p

3: n_{min} – минимально устойчивые обороты вала дизеля, мин^{-1} .

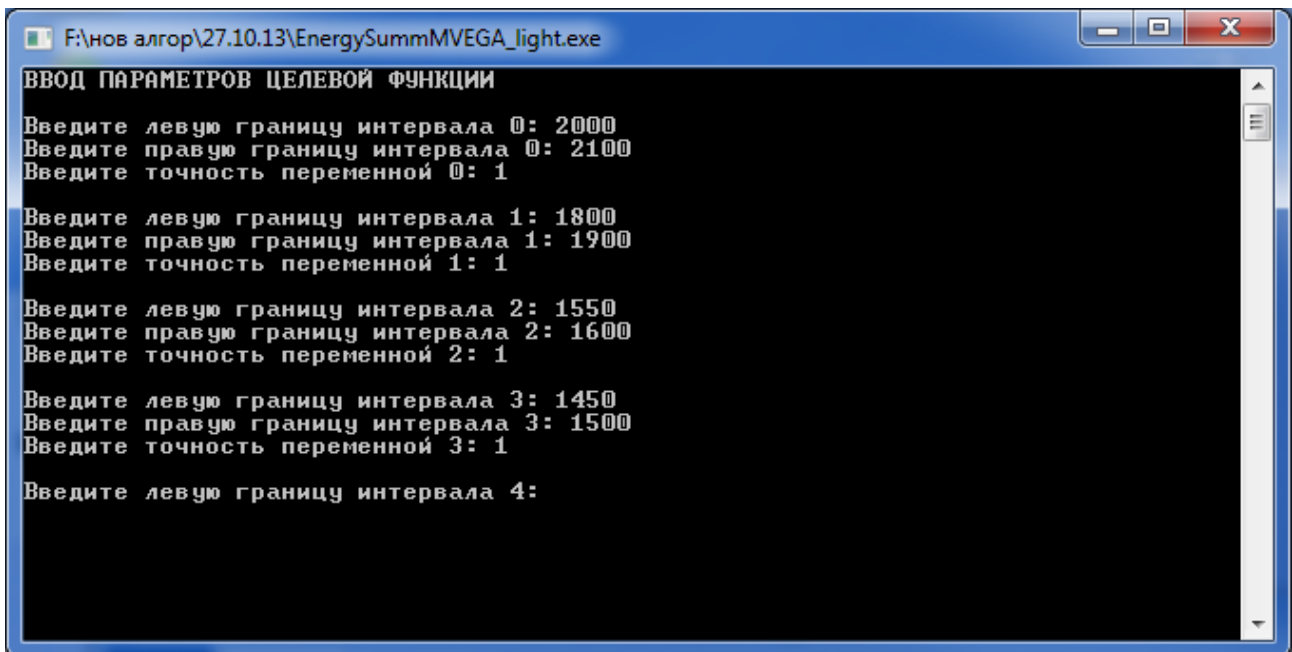


Рисунок 3.25 – Окно ввода переменной n_{min}

4: M_{nom} – номинальный крутящий момент на валу дизеля, Н·м.

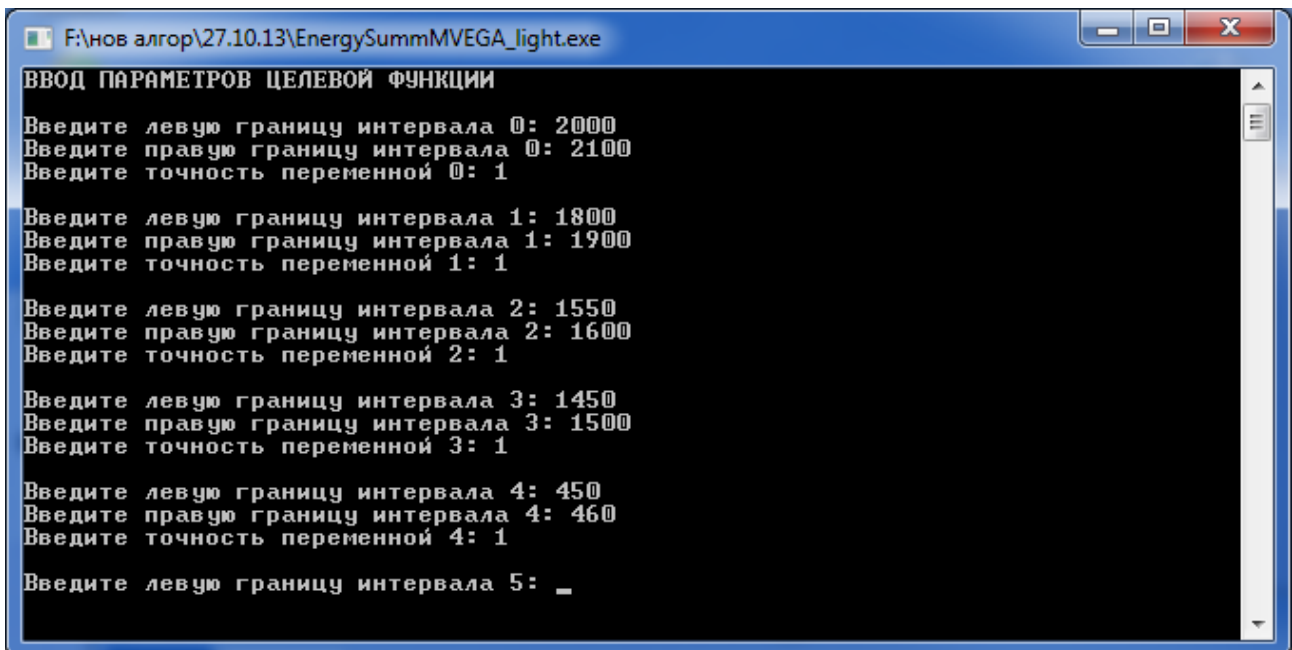


Рисунок 3.26 – Окно ввода переменной M_{nom}

5: M_k – среднее значение крутящего момента, Н·м.

6: k_p – коэффициент приспособляемости по предельному моменту.

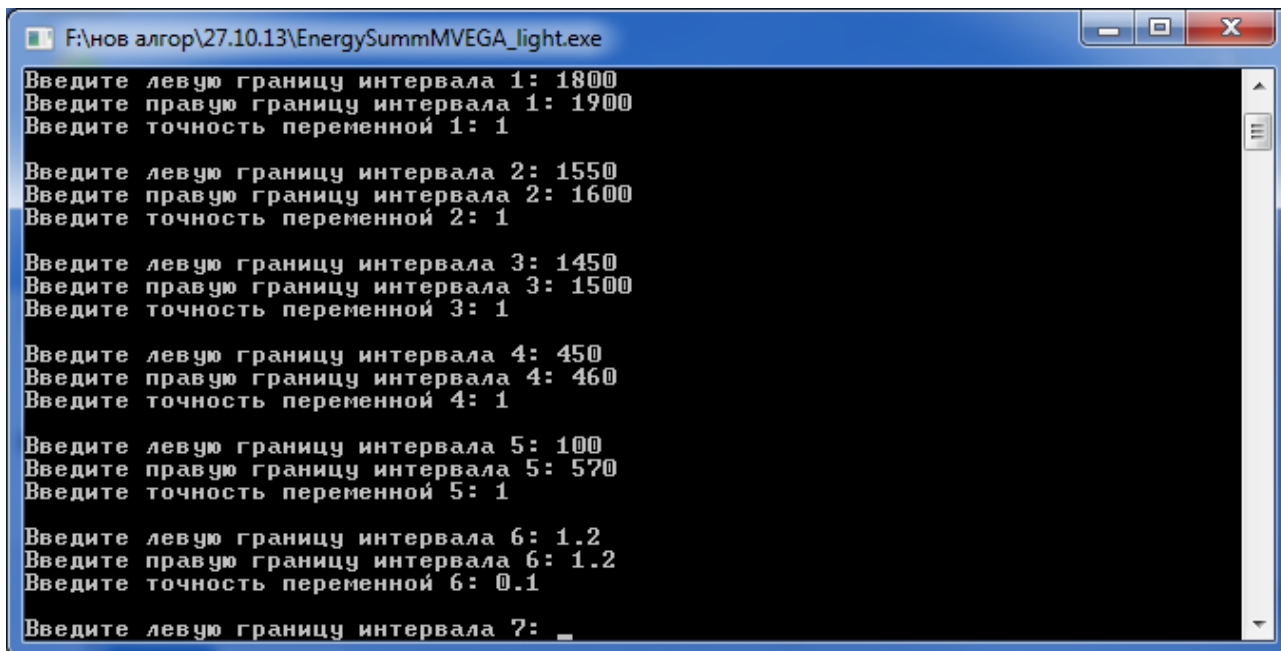


Рисунок 3.27 – Окно ввода переменных M_k и k_p

7: k – коэффициент приспособляемости по максимальному моменту.

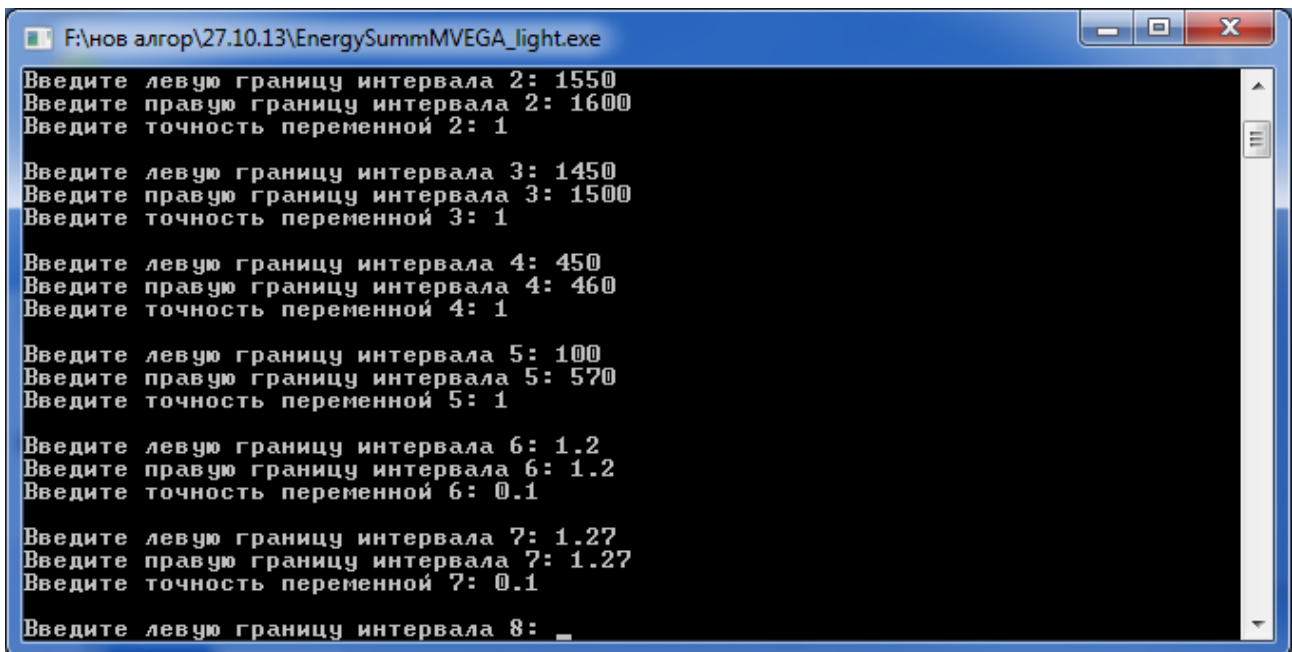


Рисунок 3.28 – Окно ввода переменной k

8: νm – коэффициент вариации крутящего момента.

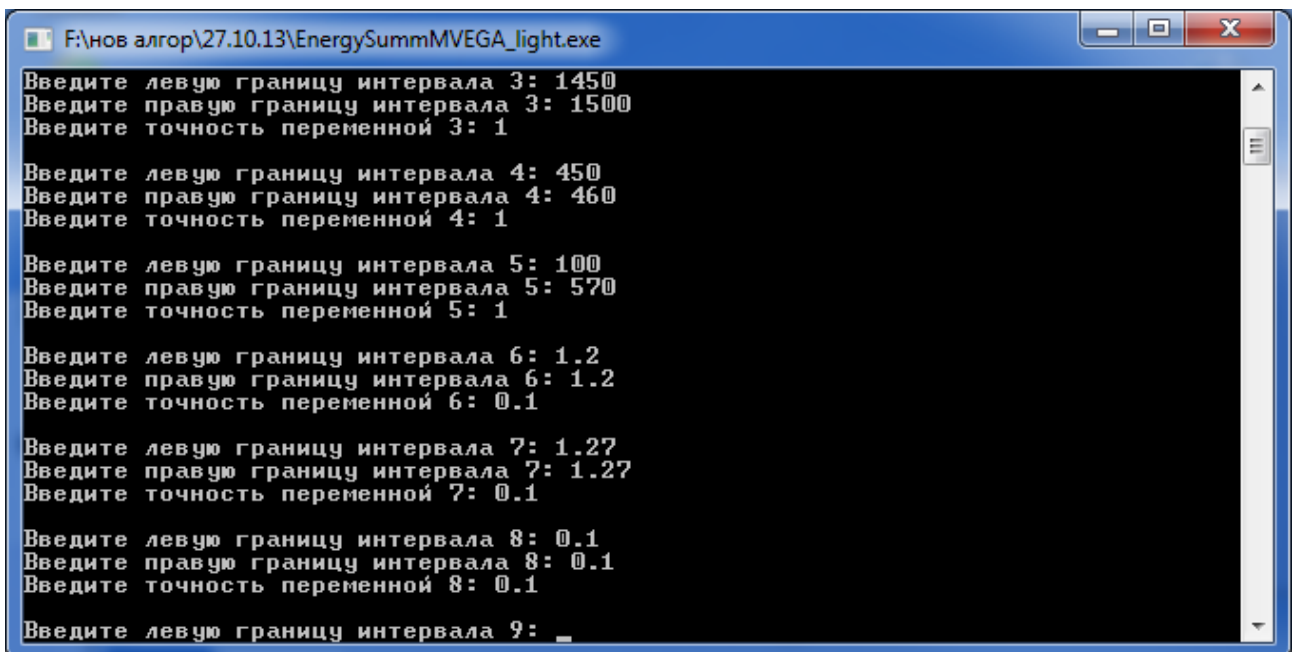


Рисунок 3.29 – Окно ввода переменной νm

9: Gt_x – часовой расход топлива на холостом ходу дизеля, кг/ч.

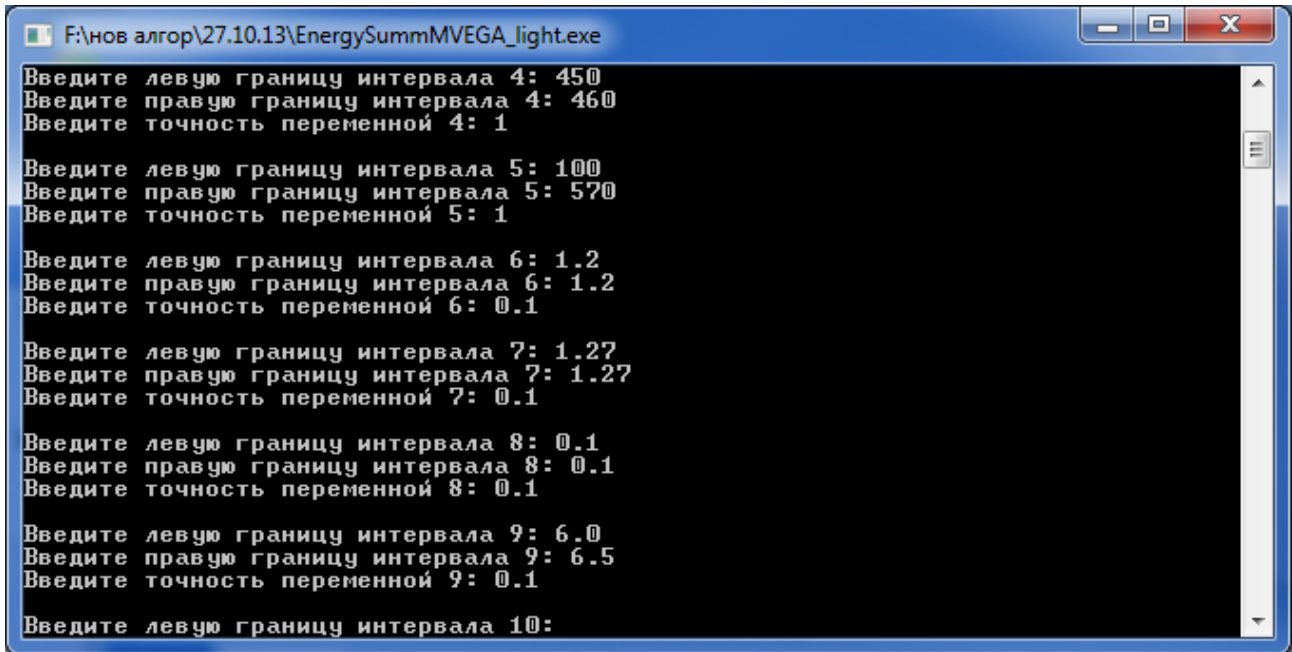


Рисунок 3.30 – Окно ввода переменной Gt_x

10: Gt_{nom} – номинальный часовой расход топлива, кг/ч.

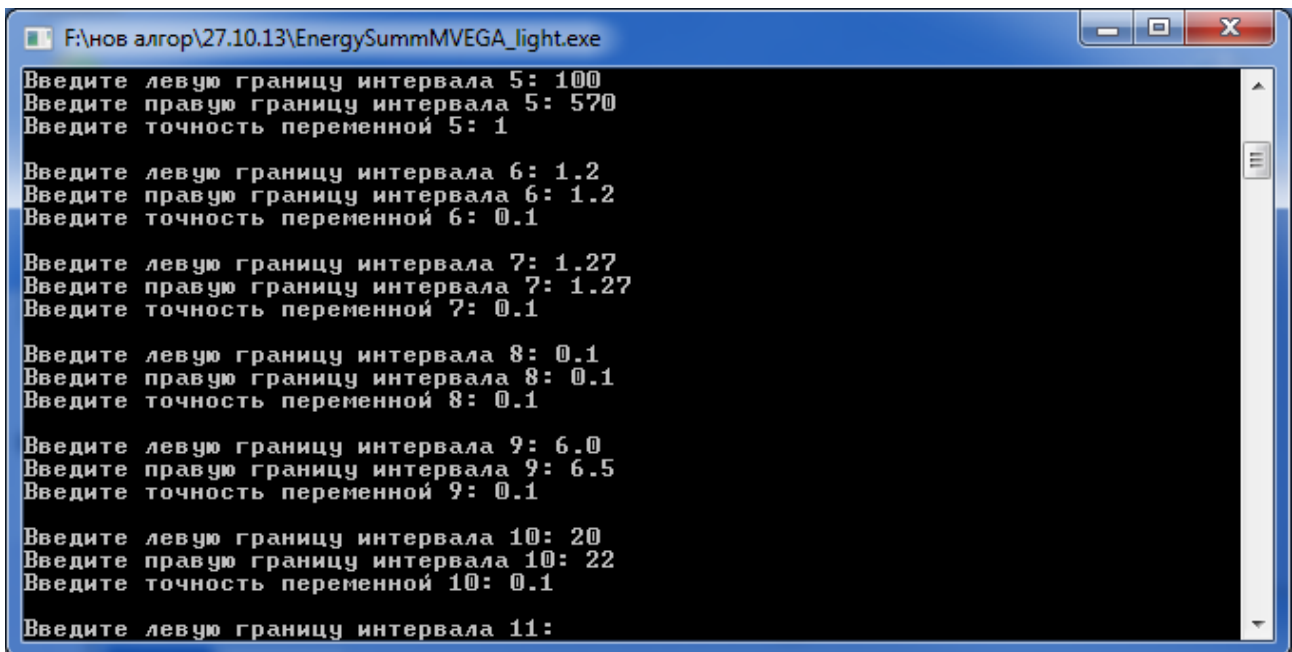


Рисунок 3.31 – Окно ввода переменной $Gt_{пот}$

11: $tetta_e$ – эффективный КПД двигателя.

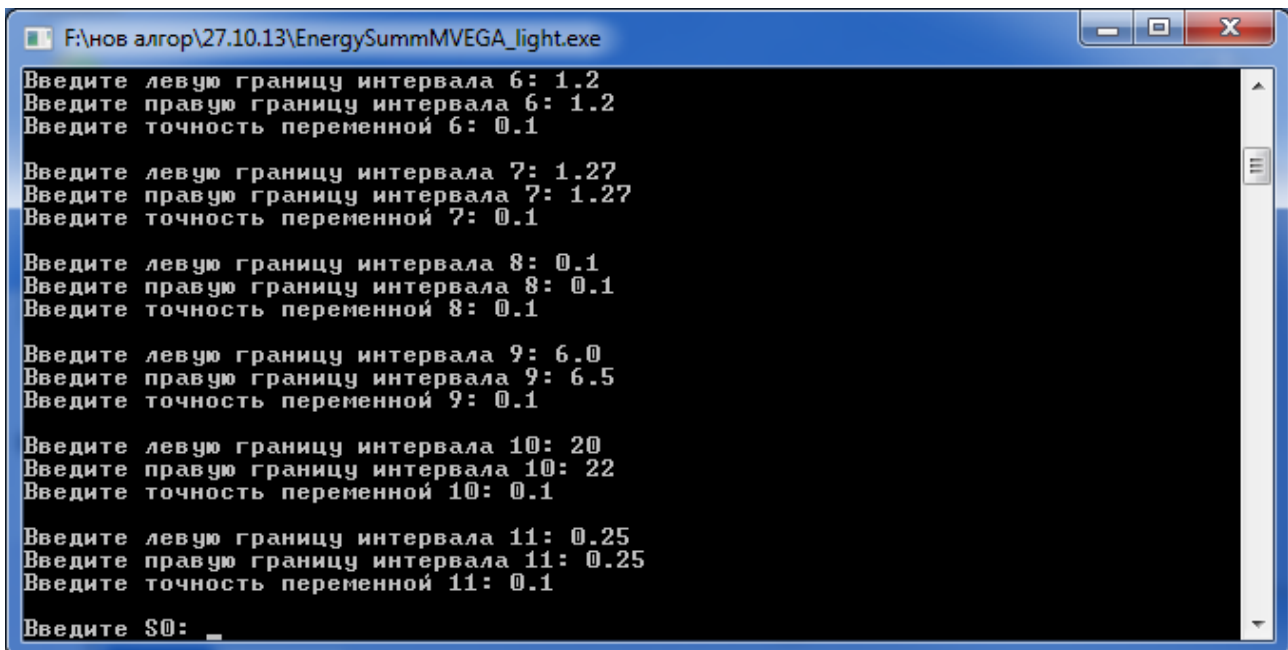


Рисунок 3.32 – Окно ввода переменной $tetta_e$

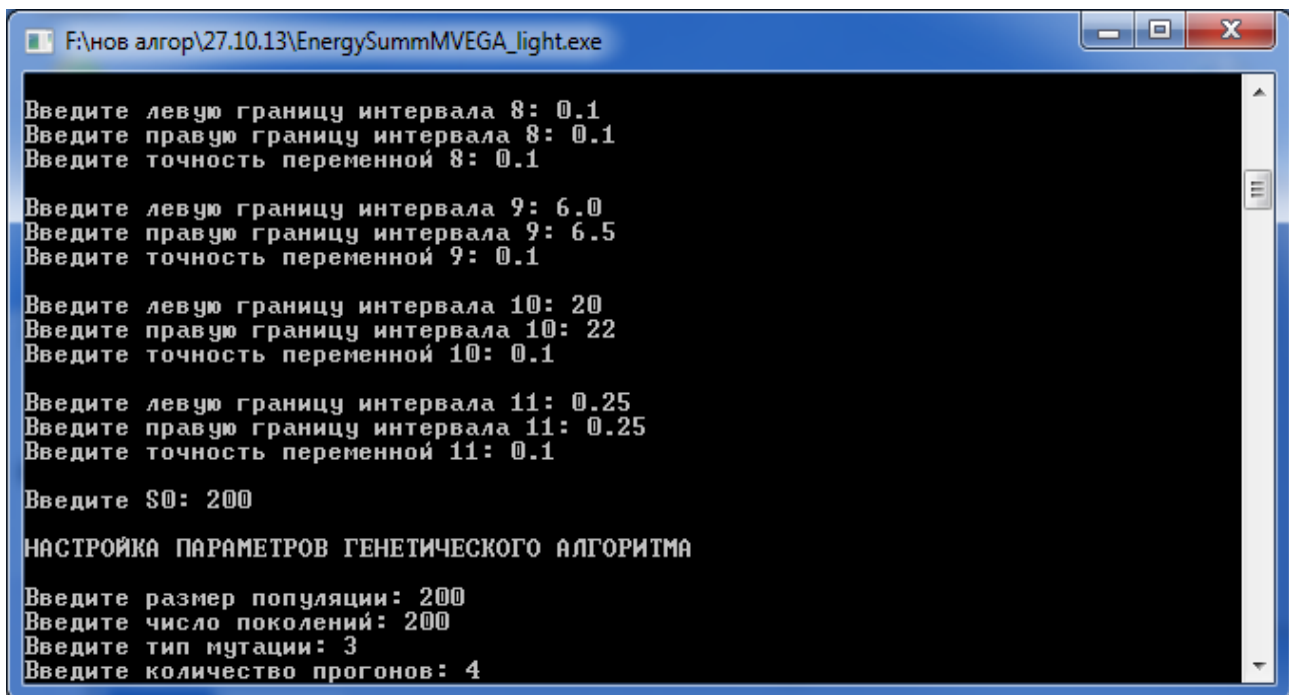


Рисунок 3.33 – Окно ввода параметров алгоритма

Результаты работы алгоритма представлены на рисунке 3.34, а, б.

В каждом прогоне вышеназванных алгоритмов найдена лучшая точка, содержащая данные о значениях оптимальных параметров стендовой характеристики, соответствующие им значения N_e и $N_{кр}$, G_T , а также данные об оптимальных нагрузочных режимах работы двигателя трактора на режиме рабочего хода с учетом коэффициентов вариации крутящего момента на валу двигателя V_M . Так же представлены:

$\lambda^* \bar{E}_{MTA}$ – оптимальное значение коэффициента оценки величины энергозатрат при использовании МТА;

\bar{E}_{MTA}^* – среднее значение энергозатрат при использовании МТА в области оптимального нагрузочного режима работы двигателя, МДж/га;

\bar{E}_{MTA6} – базовое значение энергозатрат при использовании агрегата в области номинального режима работы двигателя, МДж/га.

```
F:\нов алгорит\27.10.13\EnergySummMVEGA_light.exe
ПОИСК ОПТИМАЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Proгон#1
Лучшая точка <2088,1900,1594,1491,460,479,1.2,1.27,0.1,0.1,20,0.25>,
значение функции Ne = 89.9591 Gt = 23.2858 найдена в 167 поколении.

Суммарные энергозатраты:5418.89
Базовые энергозатраты:5466.92

Коэффициент оценки энергозатрат: 0.991215

Proгон#2
Лучшая точка <2061,1900,1596,1481,460,479,1.2,1.27,0.1,0.1,20,0.25>,
значение функции Ne = 89.9352 Gt = 23.2787 найдена в 193 поколении.

Суммарные энергозатраты:5420.13
Базовые энергозатраты:5468.9

Коэффициент оценки энергозатрат: 0.991083
```

а

```
F:\нов алгорит\27.10.13\EnergySummMVEGA_light.exe
Proгон#3
Лучшая точка <2100,1900,1584,1474,454,455,1.2,1.27,0.1,0.1,20,0.25>,
значение функции Ne = 87.3705 Gt = 21.8235 найдена в 197 поколении.

Суммарные энергозатраты:5537.11
Базовые энергозатраты:5540.59

Коэффициент оценки энергозатрат: 0.999372

Proгон#4
Лучшая точка <2092,1898,1600,1493,460,505,1.2,1.27,0.1,0.1,20,0.25>,
значение функции Ne = 91.1397 Gt = 25.3278 найдена в 199 поколении.

Суммарные энергозатраты:5405.38
Базовые энергозатраты:5467.93

Коэффициент оценки энергозатрат: 0.98856
```

Рисунок 3.34 – Результаты работы алгоритма

**Результаты расчета оптимальных параметров стендовых
и тяговых характеристик тракторов различных классов тяги**

Расчеты проводились с использованием многокритериальных алгоритмов оптимизации параметров стендовых и тяговых характеристик при различных значениях коэффициентов вариации крутящего момента на валу дизеля V_M и коэффициента вариации силы тяги на крюке трактора V_P . Перечень вводимых параметров целевых функций (переменных оптимизационной задачи) для трех генетических алгоритмов, с помощью которых проводились расчеты, представлены выше.

**Расчет оптимальных параметров стендовой характеристики
двигателя колесного трактора тягового класса 14 кН с учетом
минимального значения коэффициента оценки энергозатрат
(коэффициент вариации крутящего момента 0,05)**

Ввод параметров целевой функции

Введите левую границу интервала 0: 2300.

Введите правую границу интервала 0: 2400.

Введите точность переменной 0: 1.

Введите левую границу интервала 1: 2100.

Введите правую границу интервала 1: 2200.
Введите точность переменной 1: 1.
Введите левую границу интервала 2: 1450.
Введите правую границу интервала 2: 1550.
Введите точность переменной 2: 1.
Введите левую границу интервала 3: 250.
Введите правую границу интервала 3: 260.
Введите точность переменной 3: 1.
Введите левую границу интервала 4: 100.
Введите правую границу интервала 4: 280.
Введите точность переменной 4: 1.
Введите левую границу интервала 5: 1.1.
Введите правую границу интервала 5: 1.12.
Введите точность переменной 5: 0.01.
Введите левую границу интервала 6: 0.05.
Введите правую границу интервала 6: 0.05.
Введите точность переменной 6: 0.05.
Введите левую границу интервала 7: 4.5.
Введите правую границу интервала 7: 5.0.
Введите точность переменной 7: 0.1.
Введите левую границу интервала 8: 18.
Введите правую границу интервала 8: 19.

Введите точность переменной 8: 0.1.

Введите левую границу интервала 9: 1.35.

Введите правую границу интервала 9: 1.35.

Введите точность переменной 9: 0.1.

Введите S0: 200 (объем выполняемой работы).

Настройка параметров генетического алгоритма

Введите размер популяции: 200.

Введите число поколений: 200.

Введите тип мутации: 3.

Введите количество прогонов: 3.

Поиск оптимального решения

Прогон#1.

Лучшая точка (2400, 2200, 1528, 260, 246, 1.11, 0.05, 4.5, 18, 1.35).

Значения лучшей точки содержат данные об оптимальных значениях стендовой характеристики двигателя, соответствующие им оптимальное значение номинального крутящего момента на валу двигателя (260 кН) и оптимальный нагрузочный режим в области крутящего момента 246 кН при коэффициенте вариации момента 0,05.

Значение функции $N_e = 56.4314$ кВт, $G_t = 17.1854$ кг/ч найдена в 185 поколении.

Данные значения мощности N_e и часового расхода топлива G_t соответствуют оптимальному нагрузочному режиму.

Суммарные энергозатраты: 8364.96 МДж в области оптимального нагрузочного режима с учетом значений $N_e = 56.4314$ кВт и $G_t = 17.1854$ кг/ч.

Базовые энергозатраты: 8369.47 МДж в области номинального крутящего момента с учетом снижения номинальной мощности.

Коэффициент оценки энергозатрат: 0.999462.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Раскройте характер влияния колебаний нагрузки на параметры МТА.
2. Поясните методику аппроксимации стендовых характеристик дизеля.
3. Каков диапазон изменения коэффициента вариации крутящего момента на коленчатом валу дизеля трактора?
4. Какой метод используется для нахождения оптимальных параметров и режимов работы МТА?
5. Что такое среднее значение энергетического параметра работы двигателя?
6. На какую максимальную величину могут ухудшиться энергетические показатели работы МТА под воздействием переменной нагрузки?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Задача оптимизации параметров и режимов работы сельскохозяйственных машинно-тракторных агрегатов при воздействии на них переменных внешних факторов должна рассматриваться как многокритериальная с участием определенного количества переменных, многие из которых являются так называемыми независимыми переменными. Переменные величины, входящие в состав целевых функций, определяющих связь между входными воздействиями и выходными параметрами агрегатов, имеют свои области определения значений. В пределах этих областей определения или ограничения можно находить оптимумы параметров двигателя и трактора, входящего в состав мобильного машинно-тракторного агрегата и на их основе определять уровень энергоматериальных затрат при использовании МТА в процессе производства сельскохозяйственной продукции.

При решении 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.

В данном учебном пособии представлены методики оценки влияния переменных внешних факторов на показатели работы МТА в условиях переменной внешней нагрузки и многокритериальной оптимизации энергоматериальных затрат на режиме рабочего хода МТА с использованием генетических алгоритмов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев, Л.Е. Основы расчета оптимальных и допускаемых режимов работы машинно-тракторных агрегатов / Л.Е. Агеев. – Л.: Колос, 1978.
2. Агеев, Л.Е. Определение законов распределения выходных энергетических параметров тракторов класса 1,4 при вероятностном характере внешней нагрузки / Л.Е. Агеев, У.П. Латыпов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1988. – № 1.
3. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М.: Наука, 1969.
4. Иофинов, С.А. Эксплуатация машинно-тракторного парка / С.А. Иофинов, Г.П. Лышко. – М.: Колос, 1984.
5. Лурье, А.Б. Статистическая динамика сельскохозяйственных агрегатов / А.Б. Лурье. – Л.: Колос, 1970.
6. Журавлев, С.Ю. Минимизация энергозатрат при использовании машинно-тракторных агрегатов / С.Ю. Журавлев. – Красноярск, 2013.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица 1 – Значения энергетических параметров двигателей, используемые при расчетах на ПЭВМ

Показатель	Двигатель					
	Д-240	СМД-62	Д-160	ЯМЗ-240Б	ТМЗ 8481.10	Deere Power Tech
M_H , Н·м	255	552	955	1105	1296	1037
M_n	-	-	-	-	1450	1262
M_{max} , Н·м	293	634	1052	1237	1570	1452
n_H , об/мин	2200	2100	1250	1900	1900	2100
n_x	2385	2280	1320	2150	2100	2300
n_{min}	1560	1500	950	1500	1400	1600
n_n	-	-	-	-	1700	1900
G_{TH} , кг	14,8	30,6	32,5	55,5	54,7	53,2
G_{TO}	14,04	28,8	28,2	52,9	46,9	60,7
G_{TP}	-	-	-	-	54,7	63,2
G_{TK}	11,7	23,8	12,5	43,8	16,3	13,2

K	1,15	1,15	1,1	1,12	1,212	1,4
K_n	-	-	-	-	1,123	1,22
$K_a, \text{кН/м}$	16,8	28	50	44,8	44,8	-
$\eta_{\text{тр}}$	0,534	0,643	0,7	0,6	0,6	0,6
V_{M_k}	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30

Таблица 2 – Значения функции Лапласа $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\alpha^2/2} d\alpha$

t_H	$\Phi(t_H)$	t_H	$\Phi(t_H)$	t_H	$\Phi(t_H)$	t_H	$\Phi(t_H)$	t_H	$\Phi(t_H)$	t_H	$\Phi(t_H)$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,00	0,00000	0,50	0,19146	1,00	0,34134	1,50	0,43319	2,00	0,47725	3,00	0,49865

0,01	0,00399	0,51	0,19497	1,01	0,34375	1,51	0,43448	2,02	0,47831	3,05	0,49886
0,02	0,00798	0,52	0,19847	1,02	0,34614	1,52	0,43574	2,04	0,47932	3,10	0,49903
0,03	0,01197	0,53	0,20194	1,03	0,34849	1,53	0,43699	2,06	0,48030	3,15	0,49918
0,04	0,01595	0,54	0,20540	1,04	0,35083	1,54	0,43822	2,08	0,48124	3,20	0,49931
0,05	0,01994	0,55	0,20884	1,05	0,35314	1,55	0,43943	2,10	0,48214	3,25	0,49942
0,06	0,02392	0,56	0,21226	1,06	0,35543	1,56	0,44062	2,12	0,48300	3,30	0,49952
0,07	0,02790	0,57	0,21566	1,07	0,35769	1,57	0,44179	2,14	0,48382	3,35	0,49960
0,08	0,03188	0,58	0,21904	1,08	0,35993	1,58	0,44295	2,16	0,48461	3,40	0,49966
0,09	0,03586	0,59	0,22240	1,09	0,36214	1,59	0,44408	2,18	0,48537	3,45	0,49972
0,10	0,03983	0,60	0,22575	1,10	0,36433	1,60	0,44520	2,20	0,48610	3,50	0,49977
0,11	0,04380	0,61	0,22907	1,11	0,36650	1,61	0,44630	2,22	0,48679	3,55	0,49981
0,12	0,04776	0,62	0,23237	1,12	0,36864	1,62	0,44738	2,24	0,48745	3,60	0,49984
0,13	0,05172	0,63	0,23565	1,13	0,37076	1,63	0,44845	2,26	0,48809	3,65	0,49987

0,14	0,05567	0,64	0,23891	1,14	0,37286	1,64	0,44950	2,28	0,48870	3,70	0,49989
Продолжение табл. 2											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,15	0,05962	0,65	0,24215	1,15	0,37493	1,65	0,45053	2,30	0,48928	3,75	0,49991
0,16	0,06356	0,66	0,24537	1,16	0,37698	1,66	0,45154	2,32	0,48983	3,80	0,49993
0,17	0,06749	0,67	0,24857	1,17	0,37900	1,67	0,45254	2,34	0,49036	3,85	0,49994
0,18	0,07142	0,68	0,25175	1,18	0,38100	1,68	0,45352	2,36	0,49086	3,90	0,49995
0,19	0,07535	0,69	0,25490	1,19	0,38298	1,69	0,45449	2,38	0,49134	3,95	0,49996
0,20	0,07926	0,70	0,25804	1,20	0,38493	1,70	0,45543	2,40	0,49180	4,00	0,49997
0,21	0,08317	0,71	0,26115	1,21	0,38686	1,71	0,45637	2,42	0,49224	4,05	0,49997
0,22	0,08706	0,72	0,26424	1,22	0,38877	1,72	0,45728	2,44	0,49266	4,10	0,49998

0,23	0,09095	0,73	0,26730	1,23	0,39065	1,73	0,45818	2,46	0,49305	4,15	0,49998
0,24	0,09483	0,74	0,27035	1,24	0,39251	1,74	0,45907	2,48	0,49343	4,20	0,49999
0,25	0,09871	0,75	0,27337	1,25	0,39435	1,75	0,45994	2,50	0,49379	4,25	0,49999
0,26	0,10257	0,76	0,27637	1,26	0,39617	1,76	0,46080	2,52	0,49413	4,30	0,49999
0,27	0,10642	0,77	0,27935	1,27	0,39796	1,77	0,46164	2,54	0,49446	4,35	0,49999
0,28	0,11026	0,78	0,28230	1,28	0,39973	1,78	0,46246	2,56	0,49477	4,40	0,49999
0,29	0,11409	0,79	0,28524	1,29	0,40147	1,79	0,46327	2,58	0,49506	4,45	0,50000
0,30	0,11791	0,80	0,28814	1,30	0,40320	1,80	0,46407	2,60	0,49534	4,50	0,50000
0,31	0,12172	0,81	0,29103	1,31	0,40490	1,81	0,46485	2,62	0,49560	4,55	0,50000
0,32	0,12552	0,82	0,29389	1,32	0,40658	1,82	0,46562	2,64	0,49585	4,60	0,50000
Окончание табл. 2											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,33	0,12930	0,83	0,29673	1,33	0,40824	1,83	0,46638	2,66	0,49609	4,65	0,50000

0,34	0,13307	0,84	0,29955	1,34	0,40988	1,84	0,46712	2,68	0,49632	4,70	0,50000
0,35	0,13683	0,85	0,30234	1,35	0,41149	1,85	0,46784	2,70	0,49653	4,75	0,50000
0,36	0,14058	0,86	0,30511	1,36	0,41309	1,86	0,46856	2,72	0,49674	4,80	0,50000
0,37	0,14431	0,87	0,30785	1,37	0,41466	1,87	0,46926	2,74	0,49693	4,85	0,50000
0,38	0,14803	0,88	0,31057	1,38	0,41621	1,88	0,46995	2,76	0,49711	4,90	0,50000
0,39	0,15173	0,89	0,31327	1,39	0,41774	1,89	0,47062	2,78	0,49728	4,95	0,50000
0,40	0,15542	0,90	0,31594	1,40	0,41924	1,90	0,47128	2,80	0,49744	5,00	0,50000
0,41	0,15910	0,91	0,31859	1,41	0,42073	1,91	0,47193	2,82	0,49760	-	-
0,42	0,16276	0,92	0,32121	1,42	0,42220	1,92	0,47257	2,84	0,49774	-	-
0,43	0,16640	0,93	0,32381	1,43	0,42364	1,93	0,47320	2,86	0,49788	-	-
0,44	0,17003	0,94	0,32639	1,44	0,42507	1,94	0,47381	2,88	0,49801	-	-
0,45	0,17364	0,95	0,32894	1,45	0,42647	1,95	0,47441	2,90	0,49813	-	-
0,46	0,17724	0,96	0,33147	1,46	0,42785	1,96	0,47500	2,92	0,49825	-	-

0,47	0,18082	0,97	0,33398	1,47	0,42922	1,97	0,47558	2,94	0,49836	-	-
0,48	0,18439	0,98	0,33646	1,48	0,43056	1,98	0,47615	2,96	0,49846	-	-
0,49	0,18793	0,99	0,33891	1,49	0,43189	1,99	0,47670	2,98	0,4	-	-

Таблица 3 – Значения плотности стандартного нормального распределения $\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}$

t_H	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,398942	0,398922	0,398862	0,398763	0,398623	0,398444	0,398225	0,397966	0,397668	0,397330
0,1	0,396953	0,396536	0,396080	0,395585	0,395052	0,394479	0,393868	0,393219	0,392531	0,391806
0,2	0,391043	0,390242	0,389404	0,388529	0,387617	0,386668	0,385683	0,384663	0,383606	0,382515
0,3	0,381388	0,380226	0,379031	0,377801	0,376537	0,375240	0,373911	0,372548	0,371154	0,369728
0,4	0,36827	0,366782	0,365263	0,363714	0,362135	0,360527	0,358890	0,357225	0,355533	0,353812
0,5	0,352065	0,350292	0,348493	0,346668	0,344818	0,342944	0,341046	0,339124	0,337180	0,335213
0,6	0,333225	0,331215	0,329184	0,327133	0,325062	0,322972	0,320864	0,318737	0,316593	0,314432

0,7	0,312254	0,310060	0,307851	0,305627	0,303389	0,301137	0,298872	0,296595	0,294305	0,292004
0,8	0,289692	0,287369	0,285036	0,282694	0,280344	0,277985	0,275618	0,273244	0,270864	0,268477
0,9	0,266085	0,263688	0,261286	0,258881	0,256471	0,254059	0,251644	0,249228	0,246809	0,24439
1,0	0,241971	0,239551	0,237132	0,234714	0,232297	0,229882	0,227470	0,22506	0,222653	0,220251
1,1	0,217852	0,215458	0,213069	0,210686	0,208308	0,205936	0,203571	0,201214	0,198863	0,196520
1,2	0,194186	0,19186	0,189543	0,187235	0,184937	0,182649	0,180371	0,178104	0,175847	0,173602
1,3	0,171369	0,169147	0,166937	0,164740	0,162555	0,160383	0,158225	0,15608	0,153948	0,151831
1,4	0,149727	0,147639	0,145564	0,143505	0,14146	0,139431	0,137417	0,135418	0,133435	0,131468
1,5	0,129518	0,127583	0,125665	0,123763	0,121878	0,120009	0,118157	0,116323	0,114505	0,112704
1,6	0,110921	0,109155	0,107406	0,105675	0,103961	0,102265	0,100586	0,098925	0,097282	0,095657
1,7	0,094049	0,092459	0,090887	0,089333	0,087796	0,086277	0,084776	0,083293	0,081828	0,08038
1,8	0,07895	0,077538	0,076143	0,074766	0,073407	0,072065	0,070740	0,069433	0,068144	0,066871
1,9	0,065616	0,064378	0,063157	0,061952	0,060765	0,059595	0,058441	0,057304	0,056183	0,055079
Окончание табл. 3										
t_H	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

2,0	0,053991	0,052919	0,051864	0,050824	0,04980	0,048792	0,047800	0,046823	0,045861	0,044915
2,1	0,043984	0,043067	0,042166	0,041280	0,040408	0,039550	0,038707	0,037878	0,037063	0,036262
2,2	0,035475	0,034701	0,033941	0,033194	0,03246	0,031740	0,031032	0,030337	0,029655	0,028985
2,3	0,028327	0,027682	0,027048	0,026426	0,025817	0,025218	0,024631	0,024056	0,023491	0,022937
2,4	0,022395	0,021862	0,021341	0,020829	0,020328	0,019837	0,019356	0,018885	0,018423	0,017971
2,5	0,017528	0,017095	0,016670	0,016254	0,015848	0,015449	0,015060	0,014678	0,014305	0,01394
2,6	0,013583	0,013234	0,012892	0,012558	0,012232	0,011912	0,011600	0,011295	0,010997	0,010706
2,7	0,010421	0,010143	0,009871	0,009606	0,009347	0,009094	0,008846	0,008605	0,00837	0,00814
2,8	0,007915	0,007697	0,007483	0,007274	0,007071	0,006873	0,006679	0,006491	0,006307	0,006127
2,9	0,005953	0,005782	0,005616	0,005454	0,005296	0,005143	0,004993	0,004847	0,004705	0,004567
3,0	0,004432	0,004301	0,004173	0,004049	0,003928	0,003810	0,003695	0,003584	0,003475	0,00337
3,1	0,003267	0,003167	0,00307	0,002975	0,002884	0,002794	0,002707	0,002623	0,002541	0,002461
3,2	0,002384	0,002309	0,002236	0,002165	0,002096	0,002029	0,001964	0,001901	0,001840	0,001780
3,3	0,001723	0,001667	0,001612	0,001560	0,001508	0,001459	0,001411	0,001364	0,001319	0,001275
3,4	0,001232	0,001191	0,001151	0,001112	0,001075	0,001038	0,001003	0,000969	0,000936	0,000904

3,5	0,000873	0,000843	0,000814	0,000785	0,000758	0,000732	0,000706	0,000681	0,000657	0,000634
3,6	0,000612	0,00059	0,000569	0,000549	0,000529	0,000510	0,000492	0,000474	0,000457	0,000441
3,7	0,000425	0,000409	0,000394	0,000380	0,000366	0,000353	0,000340	0,000327	0,000315	0,000303
3,8	0,000292	0,000281	0,000271	0,000260	0,000251	0,000241	0,000232	0,000223	0,000215	0,000207
3,9	0,000199	0,000191	0,000184	0,000177	0,000170	0,000163	0,000157	0,000151	0,000145	0,000139
4,0	0,000134	0,000129	0,000124	0,000119	0,000114	0,000109	0,000105	0,000101	0,000097	0,000093

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МТА**

Учебное пособие

Журавлев Сергей Юрьевич

Редактор Е.А. Семеркова

Санитарно-эпидемиологическое заключение № 24.49.04.953.П. 000381.09.03 от 25.09.2003 г.

Подписано в печать 17.12.2014. Формат 60x84/16 Бумага тип. № 1.

Печать – ризограф. Усл. печ. л. 5,57. Тираж 110 экз. Заказ № 1.

Издательство Красноярского государственного аграрного университета

660017, Красноярск, ул. Ленина, 117