

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

С.Ю. Журавлев

**МИНИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОЗАТРАТ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ
МАШИННО-ТРАКТОРНЫХ АГРЕГАТОВ**

Красноярск 2014

ББК 40.72

Ж 91

Рецензенты:

*В.А. Терсков, д-р техн. наук, профессор кафедры математики
и информатики КрИЖТ – филиал ИрГУПС*

*А.В. Минеев, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой бурения нефтяных
и газовых скважин Института нефти и газа ФГАОУ ВПО
«Сибирский федеральный университет»*

Научный редактор

Н.В. Цугленок, д-р техн. наук, профессор

Журавлев, С.Ю.

Ж 91

Минимизация энергозатрат при использовании машинно-тракторных агрегатов / С.Ю. Журавлев; Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2014. – 256 с.

ISBN 978-5-94617-315-5

Рассмотрена методика минимизации энергозатрат при использовании мобильных машинно-тракторных агрегатов путем подбора оптимальных параметров двигателя и трактора, входящего в состав МТА, с помощью генетических алгоритмов решения задачи многокритериальной оптимизации.

Предназначено для студентов, слушателей магистратуры, аспирантов, научных и инженерно-технических работников.

ББК 40.72

ISBN 978-5-94617-315-5

© Журавлев С.Ю., 2014

© ФГБОУ ВПО «Красноярский государственный аграрный университет», 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	8
1.1. Системный анализ научных исследований по оценке влияния вероятностных внешних воздействий на энергетические показатели МТА.....	8
1.2. Методы оптимизации параметров и режимов работы МТА.....	13
1.3. Структура энергетических затрат при использовании машинно-тракторных агрегатов.....	27
1.4. Оценка влияния оптимальных показателей работы машинно- тракторных агрегатов на энергозатраты технологического процесса.....	31
1.5. Методология вопроса и системный подход к решению задачи.....	36
2. МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МТА.....	39
2.1. Общие принципы теоретических исследований МТА и формирование модели.....	39
2.2. Вероятностно-статистическая оценка энергетических и технико-экономических показателей МТА при переменном характере внешних воздействий.....	42
2.3. Определение математических ожиданий энергетических и технико-экономических показателей МТА в зависимости от колебаний крутящего момента на валу двигателя.....	46
2.3.1. Математическое ожидание частоты вращения вала двигателя.....	47
2.3.2. Математическое ожидание часового расхода топлива.....	47
2.3.3. Математическое ожидание эффективной мощности.....	48
2.3.4. Математическое ожидание удельного расхода топлива.....	48
2.3.5. Расчет производительности МТА.....	48
2.4. Определение математических ожиданий энергетических и технико-экономических показателей МТА в зависимости от колебаний крутящего момента на валу двигателя постоянной мощности.....	49
2.4.1. Расчет математического ожидания частоты вращения коленчатого вала.....	49
2.4.2. Расчет математического ожидания эффективной мощности двигателя.....	51

2.4.3. Расчет математического ожидания часового расхода топлива.....	52
2.4.4. Расчет математического ожидания удельного расхода топлива.....	55
2.4.5. Расчет математического ожидания часовой производительности МТА.....	55
2.5. Определение математических ожиданий энергетических и технико-экономических показателей МТА в зависимости от колебаний силы тяги на крюке.....	55
2.5.1. Расчет математического ожидания рабочей скорости движения агрегата на данной передаче.....	59
2.5.2. Расчет математического ожидания крюковой мощности.....	60
2.5.3. Расчет математического ожидания часового расхода топлива на данной передаче.....	61
2.5.4. Расчет математического ожидания удельного тягового расхода топлива.....	61
2.5.5. Расчет математического ожидания производительности агрегата.....	62
2.5.6. Расчет математических ожиданий энергетических показателей МТА с классической тяговой характеристикой трактора.....	63
2.6. Оценка влияния переменных внешних факторов на энергетические затраты работы МТА.....	64
2.7. Методика расчета энергетической эффективности использования мобильных машинно-тракторных агрегатов.....	71
3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ МТА.....	81
3.1. Оценка влияния оптимальных параметров и режимов работы МТА на уровень энергозатрат технологического процесса.....	81
3.2. Формализация задачи определения оптимальных параметров и режимов работы МТА.....	88
3.3. Использование эволюционных алгоритмов или адаптивных поисковых методов при решении сложных задач оптимизации.....	91
3.4. Анализ современных методик решения многокритериальных задач оптимизации с использованием эволюционных алгоритмов....	105
3.5. Методика решения задач условной оптимизации многокритериальными генетическими алгоритмами.....	113
3.6. Методика оптимизации параметров и режимов работы машинно-тракторных агрегатов с использованием генетических алгоритмов.....	116

3.7. Генетический алгоритм решения многокритериальной задачи оптимизации энергозатрат при использовании мобильных сельскохозяйственных агрегатов.....	130
3.8. Целевые функции оптимизационной задачи и расчет энергозатрат с помощью многокритериального генетического алгоритма оптимизации.....	143
3.9. Методика однокритериальной оптимизации машинно-тракторных характеристик с использованием генетических алгоритмов.....	152
4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МАШИННО-ТРАКТОРНЫХ АГРЕГАТОВ.....	162
4.1. Методика экспериментальных исследований МТА.....	162
4.2. Методика экспериментальных исследований агрегатов на базе тракторов ДТ-75Н и ДТ-175С.....	165
4.3. Анализ результатов экспериментальных исследований.....	169
4.3.1. Вероятностно-статический анализ внешних воздействий на МТА, в состав которого входит трактор Т-170 Б.....	169
4.3.2. Корреляционно-спектральный анализ параметров работы МТА с трактором Т-170Б.....	174
4.4. Вероятностно-статистический анализ входных внешних воздействий при работе машинно-тракторных агрегатов на базе тракторов ДТ-75Н, ДТ-75М и ДТ-175С.....	178
4.4.1. Определение вероятностно-статистических характеристик входных воздействий при работе тяговых агрегатов.....	179
4.5. Корреляционно-спектральный анализ входных параметров тяговых агрегатов на базе тракторов ДТ-75Н и ДТ-175С.....	187
5. ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ МТА.....	193
5.1. Программное средство для многокритериальной оптимизации энергозатрат при использовании машинно-тракторных агрегатов..	193
5.1.1. Порядок работы с программой.....	193
5.1.2. Результаты работы алгоритма.....	194
5.2. Программное средство для однокритериальной оптимизации энергозатрат при использовании машинно-тракторных агрегатов по максимуму мощности двигателя.....	205
5.3. Программное средство для расчета оптимальных параметров характеристик двигателя и трактора с учетом минимума энергозатрат на основе многокритериального генетического алгоритма.....	220
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	238
ЛИТЕРАТУРА.....	241

ВВЕДЕНИЕ

Повышение эффективности использования современной высокопроизводительной сельскохозяйственной техники с точки зрения минимума энергозатрат технологического процесса возделывания сельскохозяйственных культур является одним из основных требований к разработке новых и модернизации существующих технических систем, используемых в качестве мобильных сельскохозяйственных агрегатов (машинно-тракторных агрегатов).

В условиях эксплуатации трактор, входящий в состав машинно-тракторного агрегата (МТА), подвергается непрерывно изменяющимся внешним воздействиям. В результате значительно ухудшаются эксплуатационные показатели агрегата. Поэтому проблема повышения эффективности использования агрегатов при выполнении технологических операций путем оптимизации параметров и режимов работы МТА имеет большое теоретическое и народнохозяйственное значение.

Успешное решение оптимизационной задачи предполагает наличие наиболее эффективного критерия (критериев) оптимизации, который позволяет оценивать результаты комплексно или системно, т.е. с учетом всех особенностей целевых функций задачи, устанавливающих взаимосвязь между входными и выходными параметрами системы.

Существуют экспериментальные и теоретические методы оценки эффективности функционирования агрегатов. Экспериментальные методы оценки очень трудоемкие, требуют значительных материальных затрат и увеличения сроков разработки новой современной техники. Более предпочтительны теоретические методы оценки, позволяющие широко использовать ЭВМ на стадии проектирования тракторов. Очень важен выбор методики оптимизации параметров и характеристик.

Целью данной работы является повышение эффективности использования МТА за счет оптимизации параметров и характеристик машинно-тракторных агрегатов с учетом уровня энергозатрат технологического процесса.

В соответствии с поставленной целью в монографии решены следующие взаимосвязанные задачи, представляющие научную новизну полученных результатов:

разработана методика определения оптимальных параметров и режимов работы МТА с использованием комплексного критерия по уровню энергетических затрат при использовании мобильных сельскохозяйственных агрегатов с тракторами различного уровня мощности (данная методика основана на системном анализе проблемы);

предложен к использованию комплексный критерий оптимизации энергетических и технико-экономических параметров работы МТА на основе двух составляющих энергозатрат технологического процесса:

а) минимум потерь урожая, обусловленных увеличением агросроков выполнения технологических операций возделывания сельскохозяйственных культур по причине снижения мощности двигателя трактора под воздействием переменных внешних факторов;

б) снижение уровня энергозатрат, обусловленных повышением расхода топлива при вероятностном характере внешней нагрузки, за счет использования оптимальных нагрузочных и скоростных режимов работы двигателя;

разработаны алгоритмы и программы, позволяющие с помощью ЭВМ определить оптимальные параметры и режимы работы МТА различных классов тяги и уровней мощности;

предложена методология обоснования оптимальных энергетических, топливно-экономических параметров и эксплуатационных режимов работы машинно-тракторных агрегатов с тракторами различных классов тяги и уровней мощности.

1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1. Системный анализ научных исследований по оценке влияния вероятностных внешних воздействий на энергетические показатели МТА

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 также 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 [1–31, 34, 36–41, 48, 92–97, 99, 101–104, 109–117].

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: академика В.И. Болтинского, профессоров Ю.К. Киртбая, А.Б. Лурье, С.А. Иофинова, Н.С. Ждановского, Л.Е. Агеева, А.Х. Морозова, В.И. Фортуну, Р.Ш. Хаббатову, А.В. Николаенко, В.Ф. Скробача, В.С. Шкрабака, И.П. Ксеновича, И.Е. Янковского, В.Г. Еникеева, Е.И. Давидсона, В.А. Смелика, М.А. Керимова, Ю.К. Ковальчука, Р.Х. Юсупова, А.П. Савельева, А.А. Зангиева, В.А. Самсонова, И.М. Шарова, Т.М. Кутькова, И.М. Панова, В.Т. Смирнова, В.Д. Шеповалова, М.М. Фирсова,

Г.Б. Шпилевского, Ю.А. Судника, В.Д. Попова, С.В. Глотова, В.А. Эвиева и других [1–31, 41–42, 50, 61, 95, 97, 100, 101, 105, 117, 120, 122–124, 126, 127, 131–133, 136–138, 152, 157, 164–171].

Приоритет в изучении проблемы влияния влияния неустановившегося характера внешней нагрузки на двигатель трактора принадлежит академику В.Н. Болтинскому [40–41]. 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.

$$M_C(t) = \bar{M}_C + A_M \sin mt = \bar{M} \left(1 + \frac{\delta_M}{2} \sin mt\right), \quad (1.1)$$

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 на валу двигателя;

$\delta_M = 2A_M/\bar{M}_C$ – 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 работе [41] В.Н. Болтинский отмечает, что причиной ухудшения показателей работы двигателя является нарушение рабочего процесса двигателя в результате воздействия на него вероятностной на-

грузки. Снижаются коэффициент наполнения, коэффициент избытка воздуха, а также 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 исследованиях [113] 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 среднее 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 А.Б. Лурье, Ю.К. Киртбая, Н.С. Ждановского, В.А. Гусятникова и Г.М. Кутькова, А.В. Николаенко и других ученых [115–117, 101–104, 68, 60, 111–113].

Дальнейшее развитие метод академика В.Н. Болтинского по определению влияния колебательного характера нагрузки на работу МТА получил в трудах профессора Ю.К. Киртбая [101–104]. Ю.К. Киртбая пришел к выводу, что тяговые процессы можно считать периодической функцией пути или времени. К такому же выводу пришли и другие ученые [1, 37, 38, 92, 117]. 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 бинорма [101]:

$$R_M = R_{cp} + \Delta R' \cos(2\pi \Delta T / T) + \Delta R'' \cos(2\pi T \Delta T / t^2), \quad (1.2)$$

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 [108]:

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos \omega_0 t + B_n \sin n \omega_0 t), \quad (1.3)$$

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 [108]:

$$A_0 = T_0^{-1} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} f(t) dt; \quad A_n = 2T_0^{-1} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} f(t) \cos n \omega_0 t dt;$$
$$B_n = 2T_0^{-1} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} f(t) \sin n \omega_0 t dt.$$

В работах профессора А.Б. Лурье [115–117] отмечается необходимость в определении динамических характеристик МТА. В результате воздействия входных переменных в процессе работы МТА вероятностные характеристики его выходных 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-статическом смысле) [1–31, 41, 92–98, 115–117]. Причем, закон эмпирического распределения низкочастотных составляющих внешних воздействий близок к нормальному закону распределения случайных величин [1–31, 92–98, 115–117 и др.]. Поэтому

для оценки влияния переменных внешних факторов на выходные параметры мобильного машинно-тракторного агрегата предпочтительно использовать вероятностно-статистический метод с использованием 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 [1–31, 93, 109, 136, 137, 170].

В работах [1–31, 92, 96] 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 [1–15, 17–32] 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_{kp} – тяговая мощность, кВт; G_T – часовой расход топлива, кг/ч; g_{kp} – 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_{kp}) отклоняются от своих значений, полученных при статическом характере нагрузке. Это отклонение зависит от величины нагрузки λ_m и коэффициента вариации V_m . Чем больше V_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 [44, 51, 63–67, 121, 132, 169].

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 [1–31, 44, 51, 63–67, 75, 76, 79, 85, 86, 114, 132, 169].

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 [81].

1.2. 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 несколько групп критериев [1–31, 88–90, 96, 104, 138, 136, 146, 154].

При оптимизации режимов работы МТА по технико-экономическим показателям используются обобщенные технико-экономические критерии [1–31]:

- 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 [25].

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 [15, 17–19, 159, 167, 169, 178]. По мнению многих исследователей [158 и др.], 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 [158].

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 и энергоемкости и др. [169].

В работе [160] 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 оптимиза-

ция 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 [154, 155, 160] во многом позволяет более достоверно оценить 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.

В результате ряда проведенных исследований [14, 63–67, 167] установлено, что в реальных условиях эксплуатации фактические энергозатраты процесса превышают расчетные, причем это расхождение определяется пределами вариации случайной внешней нагрузки. Поэтому определение минимума топливно-энергетических затрат необходимо согласовывать с соответствующими оптимальными нагрузочными режимами и соответствующими этим режимам энергетическими и технико-экономическими параметрами МТА [169].

Классические методы определения оптимальных параметров и режимов работы агрегата основаны на нахождении экстремума вероятностных оценок его выходных величин [76]. Экстремумы вероятностных оценок характеризуют меру рассеяния случайной величины.

Ю.К. Киртбая предложил при определении оптимальной степени нагрузки двигателя по максимуму производительности и соответ-

ствующей топливной экономичности агрегата использовать выражение [103]:

$$\xi q_{omt} = K_q / (1 + 0,5\delta_K) , \quad (1.4)$$

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 [96]

$$\xi M_{omt}(\nu) = \left\{ \frac{\left[1 + (K_q^2 + K_q) \frac{n_H}{n_x} + (2K_q^2 - K_q - 1) \frac{n_{min}}{n_x} \right]}{[3(2 - (1 - \delta/2))^2]} \right\}^{1/2} , \quad (1.5)$$

где K_q – коэффициент приспособляемости;

n_H, n_x, n_{min} – частота вращения вала двигателя: номинальная, холостого хода, минимальная;

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]

$$\lambda_0^* = (\lambda_{n\bar{o}}^* \lambda_{Ne}^* \lambda_{GT}^* \lambda_{qe}^*)^{1/4} , \quad (1.6)$$

где $\lambda_{n\bar{o}}^*, \lambda_{Ne}^*, \lambda_{GT}^*, \lambda_{qe}^*$ – частные индексы, отвечающие стационарным экстремальным значениям математических ожиданий энергетических параметров: частота вращения вала двигателя, эффективная мощность, расход топлива. Частные индексы вычисляются по формуле

$$\lambda_i^* = M^*(y)/Y_H , \text{ или } \lambda_i^{*-1} = \frac{Y_H}{M^*(y)} , \quad (1.7)$$

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 \bar{M}_K ;

с помощью классического метода анализа функции $M(y) = f(\bar{M}_K)$ при $dM(y)/d\bar{M}_K = 0$ рассчитываются экстремальные значения момента \bar{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, 72, 73].

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

$$\Phi(t_H^*) = 0,5bb_1^{-1}, \quad (1.8)$$

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

Экстремальную степень использования крутящего момента находим по формуле

$$\lambda_{\bar{M}}^* = 1 - M_H^{-1} t_H^* \sigma_M, \quad (1.9)$$

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

$$y_1(t_H) - y_2(t_H) = 0, \quad (1.10)$$

$$\begin{aligned} \text{где } y_1(t_H) &= 0,5 a^* + b^* \bar{M}_K - b_1^* (2\bar{M}_K - M_H) \Phi(t_H); \\ y_2(t_H) &= -2 b_1^* \varphi(t_H) \sigma_M; \\ \Phi(t_H) &= (2\pi)^{-1/2} \int_0^{t_H} e^{-t^2/2} dt; \\ \Phi(t_H) &= (2\pi)^{-1/2} \exp(-0,5 t_H^2). \end{aligned}$$

Решая уравнение (2.18) 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:

$$\lambda_{\bar{M}}^* = 1 - M_H^{-1} t_H^* \sigma_M; \quad \lambda_{\bar{N}_e}^* = \bar{N}_e^* / N_{eH}, \quad (1.11)$$

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

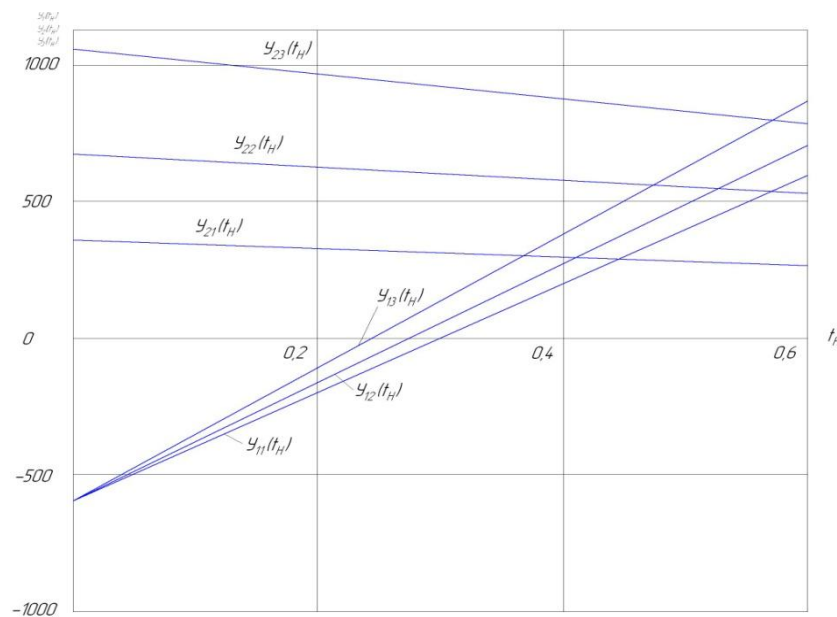


Рисунок 1.1 – Графическое определение аргумента t_H^* по эффективной мощности: 1 – $v_M = 0,1$; 2 – $v_M = 0,2$; 3 – $v_M = 0,3$

Различные методики [16, 159, 174] 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 [7, 9, 14, 67, 161] установлено, что в реальных

условиях фактические энергозатраты значительно превышают расчетные, 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 [7, 167]:

$$\mathcal{E}_Г = (E_{\text{тпб}} - \bar{E}_{\text{тп}}^*) \cdot T_Г \cdot \bar{W}_ч^*, \quad (1.12)$$

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

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

$T_Г$ – нормативная годовая загрузка агрегата;

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

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 опираются 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 [36, 72, 98, 142, 144–147, 154, 173–180].

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 [78].

Эволюционные методы начали использовать при решении определенных задач еще в 60–70-е 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 как часть 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:

индивид – решение задачи;
популяция – множество решений;
пригодность – качество решения;
хромосома – представление решения (строки символов из 0 и 1);
скрещивание – оператор поиска;
мутация – оператор поиска;
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.

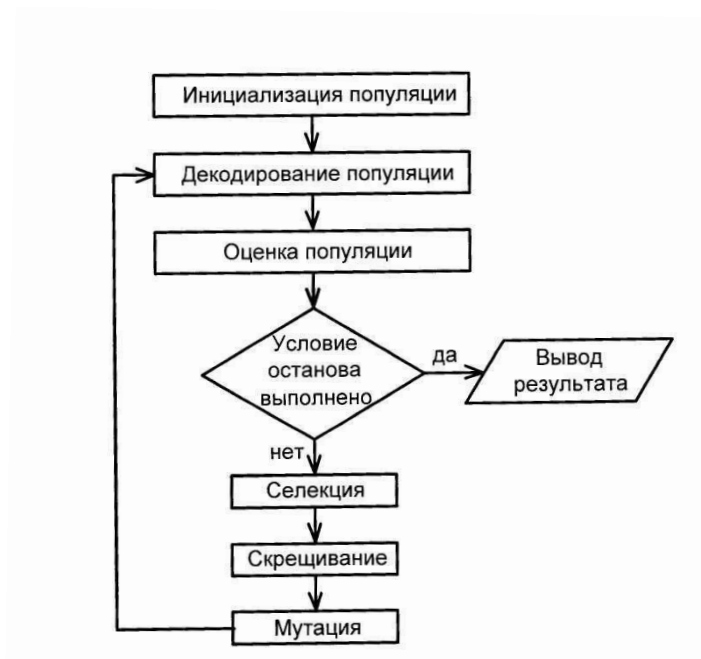


Рисунок 1.2 – Упрощенная схема генетического алгоритма

Основные критерии (условия) останова:

1. Алгоритм останавливается после истечения определенного числа итераций (полных циклов).
2. Алгоритм останавливается, если в течение определенного числа итераций полученное решение не было улучшено.
3. 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 можно представить в общем случае (рисунок 1.3).

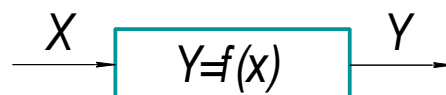


Рисунок 1.3 – Модель типа «вход – выход»

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 [78]:

$$(n_d, N_e, G_m, g_e) = f(M_k); \quad (1.13)$$

$$(M_k, N_e, G_m, g_e) = f(n_d); \quad (1.14)$$

$$(v_p, N_{кр}, G_m, g_{кр}) = f(P_{кр}). \quad (1.15)$$

При работе МТА входящие воздействия являются случайными величинами потому, что их значения хаотически колеблются относительно среднего значения, и эти колебания носят непрерывный характер. Поэтому для установления окончательного вида целевой функции может быть использован метод функций случайных аргументов [78].

Он основывается на том, что колебания входящих параметров (M_k , n_d) находятся в пределах 0–5 Гц. Именно этот спектр колебаний оказывает наиболее отрицательное влияние на энергетику двигателя. Кроме того, установлено, что колебания входных параметров подчиняются нормальному закону распределения, т.е. коэффициент вариации частоты вращения коленчатого вала и крутящего момента находится в пределах 0–0,33. Ухудшение энергетических показателей работы дизеля происходит, прежде всего, из-за нелинейности его регуляторной характеристики. Рабочая точка, находясь в области номинального момента M_n , вследствие колебаний M_k переходит с одной ветви на другую, при этом происходит деформация регуляторной характеристики и, как следствие, снижение мощности дизеля и повышение расхода топлива. Для определения степени влияния переменных внешних воздействий на энергетику тракторного дизеля с использованием ранее названного метода функций случайных аргументов разработаны выражения для расчета математических ожиданий эффективной мощности, часового и удельного расхода топлива

[1, 31]. Рассмотрим регуляторную характеристику двигателя (рисунок 1.4).

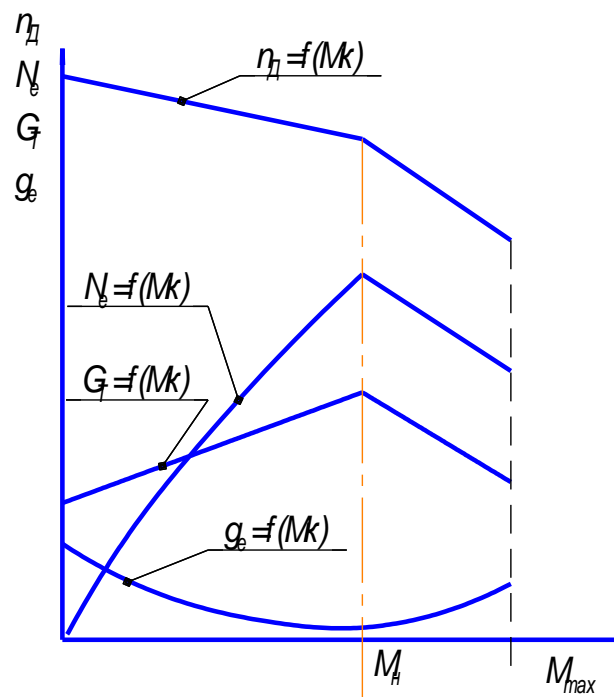


Рисунок 1.4 – Регуляторная характеристика тракторного дизеля:

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_H – номинальный крутящий момент, н·м

В качестве функций связи между входными и выходными величинами используются зависимости, полученные в ходе аппроксимации регуляторной характеристики двигателя [1]:

для частоты вращения вала двигателя:

$$n_d = \begin{cases} A_1^* + B_1^* M_k & \text{при } M_k \leq M_H \\ A_2 + B_2^* M_k & \text{при } M_k > M_H \end{cases}, \quad (1.16)$$

для часового расхода топлива:

$$G_T = \begin{cases} A_1 + B_1 M_k & \text{при } M_k \leq M_H \\ A_2 + B_2 M_k & \text{при } M_k > M_H \end{cases}, \quad (1.17)$$

для эффективной мощности:

$$n_d = \begin{cases} C(A_1^* M_k + B_1^* M_k^2) & \text{при } M_k \leq M_H \\ C(A_2^* M_k + B_2^* M_k^2) & \text{при } M_k > M_H \end{cases}, \quad (1.18)$$

где $A_1^*, A_2^*, B_1^*, B_2^*, A_1, A_2, B_1, B_2$ – постоянные величины и угловые коэффициенты, определяемые при аппроксимации характеристик двигателя;

$$C = 9550^{-1}.$$

При установлении зависимостей для расчета математических ожиданий энергетических параметров работы двигателя используется выражение

$$\bar{y} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)Y(x)dx, \quad (1.19)$$

где $f(x)$ – функция связи, установленная при аппроксимации регуляторной характеристики;

$Y(x)$ – плотность распределения крутящего момента M_k :

$$Y(x) = \sigma_x^{-1} Y(t), \quad (1.20)$$

где σ_x – стандарт аргумента;

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

Подставляя в выражение (1.19) зависимости (1.16)–(1.18), а также (1.20), получаем выражения для расчета N_e, G_T, g_e .

После преобразований имеем [1]:

$$\bar{N}_e = f(M_k) = 9550^{-1} \left[0,5(a_1^* \bar{M}_k + b_1^* \bar{M}_k^2 + b^* \sigma_M^2) - (a_1^* \bar{M}_k + b_1^* \bar{M}_k^2 + b_1^* \sigma_M^2) \Phi(t_H) + b_1^* Y(t_H) \bar{M}_k \sigma_M \right], \quad (1.21)$$

где \bar{M}_k – текущее среднее значение крутящего момента и частота вращения коленчатого вала;

a_1^*, b_1^*, a^*, b^* – расчетные коэффициенты;

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

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

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

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

t_H ;

$$t_H = \frac{M_H - \overline{M}_\kappa}{\sigma_M};$$

σ_M – стандарт частоты вращения коленчатого вала и крутящего момента;

M_H – номинальное значение частоты вращения и крутящего момента.

Аналогично рассчитываются математические ожидания часового расхода топлива G_T .

$$\overline{G}_T = f(M_\kappa) = 0,5(a + b\overline{M}_\kappa) - (a_1 + b_1 M_\kappa)\Phi(t_H) + b_1 \sigma_M Y(t_H) \quad (1.22)$$

где a , a_1 , b , b_1 – расчетные коэффициенты.

Математическое ожидание удельного расхода топлива находим по формуле [1]

$$\overline{g}_e = \frac{\overline{G}_T}{\overline{N}_e}, \quad (1.23)$$

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

\overline{N}_e – математическое ожидание эффективной мощности, кВт.

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 [76]:

- 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, т.е. путем исследования на экстремум выражений (1.21)–(1.23) [1]. Данная методика была представлена выше. Основными недостатками данного метода являются следующие:

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 [145], так как для них такая задача не составляет дополнительных трудностей, в отличие от обычных подходов математического программирования. Преимущества генетического алгоритма:

а) 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;

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

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

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

д) 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 [68, 70]. При этом необходимо учитывать параметры и характеристики дизеля и устройств, отвечающих за протекание регуляторной (тяговой) характеристики в реальных координатах.

1.3. Структура энергетических затрат при использовании машинно-тракторных агрегатов

Сельскохозяйственное производство с момента зарождения человеческой цивилизации и по настоящее время остается 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 все в большем масштабе применял сначала примитивные, а в результате технического прогресса – все более сложные средства механизации для осуществления технологии производства продукции растениеводства. Использование

все более сложных машин и сопутствующих им средств сопровождения требует большого количества энергетических расходов, а следовательно, энергетических вложений в производство пищевых средств жизнеобеспечения человека [77].

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 ее 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.

В работе [161] 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 энергию 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.

Н.В. Цугленок отмечает [161], что в настоящее время на увеличение 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 других исследованиях [158, 159, 169] также отмечается, что затраты дополнительной энергии, в основном на ГСМ, возрастают и становятся проблемой мирового значения в связи с предстоящим истощением запасов сырья. Поэтому поиск путей снижения антропогенных энергозатрат является одним из самых перспективных направлений повышения эффективности сельскохозяйственного производства.

Энергетические затраты подразделяют на прямые и косвенные [159]. Прямые затраты непосредственно связаны с выполнением технологических операций. Косвенные затраты энергии – это затраты на изготовление средств производства.

В работе [158] эффективность использования МТА предлагается оценивать по минимуму критерия – суммарные энергетические затраты. Данный критерий имеет следующую структуру:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{u.mp} + \mathcal{E}_{u.cxm} + \mathcal{E}_{u.np} + \mathcal{E}_{p.mo} + \mathcal{E}_{c.p.} + \mathcal{E}_{ynp} + \mathcal{E}_{TCM} + \mathcal{E}_{nom} \rightarrow \min, \quad (1.24)$$

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

$\mathcal{E}_{u.mp}$, $\mathcal{E}_{u.cxm}$, $\mathcal{E}_{u.np}$ – энергия, затраченная на изготовление трактора, орудия, прицепа, МДж/га;

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

$\mathcal{E}_{c.p.}$ – энергия, затраченная на комплектование МТА, МДж/га;

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

\mathcal{E}_{TCM} – энергия топливно-смазочных материалов, МДж/га;

\mathcal{E}_{nom} – потери энергии, обусловленные несоблюдением оптимальных параметров и режимов работы агрегата, МДж/га;

Две составляющие \mathcal{E}_{TCM} и \mathcal{E}_{nom} могут быть в значительной степени снижены за счет работы МТА на оптимальных скоростных и нагрузочных режимах.

Энергетические затраты технологического процесса определяются по формуле [16]

$$E_{III} = E_{II} + E_0 + (E_{жс} + E_T + E_c + E_m) \cdot W_q^{-1}, \quad (1.25)$$

где E_{II} – прямые топливно-энергетические затраты, кДж/га;

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

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

E_T, E_c и E_m – энергоемкость 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_n предлагается использовать выражение [14]:

$$\overline{E}_{\text{п}} = (\overline{G}_T \cdot t_p \cdot \alpha_T) / W_{\text{ч}} + [(G_{\text{ТХ}} \cdot t_x + G_{\text{ТО}} \cdot t_0) \cdot \alpha_T] / W_{\text{ч}}, \quad (1.26)$$

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

α_T – энергетический эквивалент дизельного топлива, МДж/кг;

$\overline{W}_{\text{ч}} = f(\overline{M}_c)$ – 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;

\overline{M}_c – момент сопротивления на коленчатом валу двигателя трактора, н · м.

Известно, что в зависимости от вида технологической операции величина топливно-энергетических затрат на холостые ходы и остановки находится в пределах 10–15% [167].

После ряда преобразований выражение для расчета основных прямых топливно-энергетических затрат принимает вид [14, 167]:

$$\overline{E}_{\text{по}} = \frac{C_E \cdot \overline{G}_T}{N_e}, \quad (1.27)$$

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;

$N_e = f(\overline{M}_c)$ – математическое ожидание эффективной мощности дизеля, кВт.

1.4. 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, т.е. 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 [160].

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 [161].

Анализ структуры энергозатрат на производство продукции растениеводства показывает, что она имеет три основных составляющих [160]:

- экологическая энергия $E_{\text{э}}$;
- антропогенная энергия $E_{\text{ан}}$;
- энергия питания почвы $E_{\text{п}}$.

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

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 учетом влияния случайных внешних факторов, приводит к снижению производительности, удлинению времени выполнения операций технологического процесса и, следовательно-

но, к нарушению агросроков возделывания сельскохозяйственных культур. Нарушение агросроков отрицательно влияет на урожайность, т.е. увеличиваются потери энергии урожая и общее количество энергозатрат процесса производства сельскохозяйственной продукции. Поэтому при повышении эффективности использования МТА с учетом энергозатрат технологического процесса необходимо учитывать спектр факторов, влияющих на обе составляющие процесса и разработать обобщающий критерий, который объединяет и прямые затраты и потери энергии урожая E_{nom} .

Энергия, потерянная через урожай, может быть определена следующим образом [160–162]:

$$E_{nom} = E_A + E_Y, \quad (1.28)$$

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

$$E_{mta} = E_{OIP} + E_A, \quad (1.29)$$

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

E_{OIP} – 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 [161, 162]:

$$\bar{E}_{opr} = \frac{C_E \cdot \bar{G}_T}{N_e}, \quad (1.30)$$

где \bar{E}_{opr} – 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 [17]:

$$\overline{N}_e = C \cdot \left\{ 0,5 \cdot \left[a^* \cdot \overline{M}_K + e^* \cdot \overline{M}_K^2 \cdot (1 + v_M^2) \right] - \left[a_1^* \cdot \overline{M}_K + e_1^* \cdot \overline{M}_K^2 \cdot (1 + v_M^2) \right] \Phi(t_H) + e_1^* \cdot \varphi(t_H) \overline{M}_K^2 \cdot v_M \right\}, \quad (1.31)$$

где $C = 9554^{-1}$; a^*, e^*, a_1^*, e_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 , $t_H = (M_n - \overline{M}_K) / \sigma_n$;

M_n – номинальный крутящий момент, Н·м;

σ_n – стандарт крутящего момента;

\overline{G}_T – средний часовой расход топлива, кг/ч [17]:

$$\overline{G}_T = 0,5(a + b\overline{M}_K) - (a_1 + b_1\overline{M}_K)\Phi(t_H) + b_1\varphi(t_H)\sigma_M, \quad (1.32)$$

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 в работе [158] предлагается использовать выражение:

$$E_A = \frac{\sum_{i=1}^{N_i-1} (C_{Pi} \cdot W \cdot T_{cm} \cdot n_{cm}) + N^1 \cdot C_{Pi} \cdot W \cdot T_{cm} \cdot n_{cm}}{S_0}, \quad (1.33)$$

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

$$C_{Pi} = Y \cdot \Delta y \cdot Q / 100, \quad (1.34)$$

где Y – планируемая урожайность, кг/га;

Δy – 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

$$N^1 = \frac{S_0}{W \cdot T_{см} \cdot n_{см}}, \quad (1.35)$$

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

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

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

Значения Δy устанавливаются с учетом условий природно-климатических зон, либо могут быть приняты по следующей таблице [104, 129]:

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

Вид работы	Δy	Культура	Δy	
			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 [160]:

$$E_n = E_{\text{э}} \cdot \eta_{\text{э}} + \Delta E_{ni}, \quad (1.36)$$

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

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

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

$$\Delta E_{ni} = \sum_{i=1}^n E_{ai} \cdot \eta_{ai}, \quad (1.37)$$

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

Из выражения (1.37) получаем [160]:

$$\eta_{ai} = \Delta E_{ni} / \sum_{i=1}^n E_{ai}, \quad (1.38)$$

В таблице 1.3 представлены значения ΔE_{ni} для одной из природно-климатических зон Красноярского края [160].

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

Вид энергетического воздействия E_{ai}	Прибавка, %	Прибавка, ц/га	Энергосо-державшие прибавки, МДж/га	Энерго-затраты, МДж/га	Чувствительность энергосопряжения
1	2	3	4	5	6
Обработка почвы под пар с внесением удобрений	20	6,40	8192	6067	1,36
Посев с внесением минеральных удобрений	6	2,88	3686	2514	1,46
Зяблевая вспашка	5	1,60	2048	1557	1,32
Подготовка семян к посеву	3,5	1,12	1434	263	5,46
Лущение	4	1,28	1638	554	2,96

1	2	3	4	5	6
Предпосевная культивация	4	1,28	1638	246	6,66
Химпрополка	4	1,28	1638	255	6,42
Обработка ядами	4	1,28	1638	255	6,42
Закрытие влаги	3	0,96	1228	199	6,18
Боронование всходов	2	0,64	820	199	4,12

1.5. Методология вопроса и системный подход к решению задачи

В работе [160] отмечается, что многообразие факторов, участвующих в процессе производства продукции растениеводства, а также факторов, влияющих на эффективность применения технологических приемов, эффективность использования технических средств, обуславливает необходимость системного подхода и разработки соответствующей методологии решения проблемы. Для успешного подхода к решению определенных комплексных задач в науке необходимо применение системного анализа.

Системный подход является направлением методологии научного познания. В его основе лежит исследование объектов в виде определенных систем. Методология и специфика системного подхода к изучению сложных объектов заключаются в том, что данные объекты исследуются во взаимодействии их составных частей с выявлением типов связей между внутренними и внешними факторами, определяющими характер поведения предмета исследования. Многообразие связей между различными факторами образует определенную целостность объекта.

Системный анализ в широком смысле является составной частью системного подхода к изучению, в частности, сложных технических объектов. Основными положениями системного анализа являются следующие [153]:

определение и четкое формулирование конечной цели являются начальной фазой принятия решений;

проблема рассматривается как единая система с выявлением взаимосвязей отдельных элементов;

наличие анализа возможных альтернативных путей достижения цели;

исследование поведения отдельных элементов системы должно быть согласовано с общими целями всей программы.

Итог проведения системного анализа в процессе исследований – построение структурной модели, отображающей все факторы и взаимосвязи внутри ее, взаимосвязи процессов на входе в систему и на выходе из нее.

Методологические средства, применяемые при исследовании поведения системы, выбираются в зависимости от сложности конечного результата. Когда достигается определенная цель исследований, и конечный результат может быть оценен с помощью одного критерия, используются методы математического программирования. Если же степень достижения цели необходимо оценивать с использованием нескольких критериев, в том числе и альтернативных, применяют методы, позволяющие упорядочить и определить важность каждого из них.

Исследуемая сложная система является объектом, части которого можно рассматривать как системы, объединенные между собой в единое целое с помощью определенных связей с заданными параметрами.

Исходя из определения сложной системы, машинно-тракторный агрегат является именно такой системой, так как в процессе выполнения технологических операций он подвергается воздействию ряда факторов, влияющих на конечный результат его работы определенным образом, и характер протекания этого процесса требует использования системного подхода к изучению закономерностей взаимодействия составных частей системы.

Основным методом исследования сложных систем [133] является математическое моделирование, в том числе имитация процессов функционирования сложных систем с целью установления связей между входными воздействиями и выходными параметрами на ЭВМ. Для построения модели системы необходимо представить процессы ее функционирования в виде последовательности четко определяемых, взаимосвязанных процессов и разработать математическое описание поведения сложной системы.

Центральной процедурой в системном анализе является построение обобщенной модели, отображающей взаимосвязи между исследуемыми параметрами модели.

При решении задач повышения эффективности работы МТА использование системного подхода к решению проблемы позволяет на макроуровне рассматривать взаимосвязь с воздействующими на агрегат внешними факторами и его выходными параметрами с последующим установлением оптимальных режимов по минимуму энергозатрат.

Выводы

Исходя из материалов, представленных в первом разделе, можно утверждать, что одним из основных направлений снижения энергозатрат при использовании МТА является совершенствование методологии оптимизации эксплуатационных параметров и режимов работы сельскохозяйственных мобильных агрегатов с учетом вероятностного характера внешней нагрузки и его негативного влияния на энергетические и технико-экономические показатели работы МТА.

Все вышесказанное определяет актуальность и народнохозяйственную значимость проблемы повышения эффективности использования сельскохозяйственной техники и снижения энергозатрат технологического процесса производства продукции растениеводства.

2. МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МТА

2.1. Общие принципы теоретических исследований МТА и формирование модели

Теоретические разработки повышают эффективность и надежность научных исследований и позволяют решать задачи с наименьшими затратами труда и средств.

В работе [86] отмечается, что «теоретическое исследование – это разработка гипотезы, доведения ее до предполагаемых зависимостей и наконец, до математических моделей».

Исходя из определения теоретических исследований, они решают научные проблемы аналитическим путем (с применением определенного математического аппарата) и позволяют выделить главные факторы и взаимосвязи, пренебрегая второстепенными.

В соответствии с основным направлением данной работы одной из основных задач теоретических исследований в области повышения эффективности использования МТА является использование математических моделей взаимосвязи входных и выходных переменных для нахождения оптимальных путей снижения энергозатрат при выполнении технологических операций [71].

В связи с поставленной целью возникает необходимость системного подхода к решению проблемы влияния оптимальных параметров и режимов работы агрегатов на конечный результат технологического процесса.

В первом разделе отмечалось, что МТА является сложной системой, поведение которой можно исследовать путем математического моделирования на основе использования методологии и методов системного анализа. Основной целью исследования является решение задачи оптимизации с несколькими критериями и целевыми функциями и установления влияния полученного результата на основные энергозатраты использования мобильных сельскохозяйственных агрегатов.

В процессе решения этой задачи планируется использование механизма эволюционных методов оптимизации, которые на основе генетического алгоритма эффективно устанавливают необходимый оптимальный вариант.

Формирование модели сложной системы имеет две стадии: макропроектирование и микропроектирование [80].

Макропроектирование (макроуровень) начинается с формулировки проблемы и решает три основных задачи:

необходимость создания модели и установление списка решаемых задач;

установление взаимосвязей между входными факторами и выходными параметрами системы, определение их характеристик;

выбор и оценка показателей эффективности системы.

Необходимость создания модели системы определяют, исходя из потребностей их практического использования.

Оценку входящих воздействий на систему производят с учетом опыта эксплуатации, а также используют статистические данные экспериментальных исследований.

Системный анализ проводится по результатам математического моделирования. Обычно отдается предпочтение моделированию системы на ЭВМ. ЭВМ использует в виде модели алгоритм. Компьютер, применяя этот алгоритм, вырабатывает информацию, которая характеризует поведение параметров системы и их взаимодействие, далее определяются показатели эффективности системы.

На макроуровне МТА (исследуя взаимосвязь входных переменных, имеющих случайный характер поведения, с выходными параметрами) можно представить в виде черного ящика (рисунок 2.1) [1]:

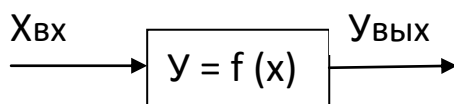


Рисунок 2.1– Модель МТА на макроуровне

Целевые функции $Y=f(x)$, связывающие $X_{вх}$ и $У_{вых}$, устанавливаются при аппроксимации регуляторных характеристик двигателя и тяговой характеристики трактора.

При нахождении оптимальных параметров и режимов работы МТА с учетом влияния внешних факторов, а также для оценки влияния показателей оптимизации на энергозатраты технологического процесса целесообразно применять ту же методику – макроскопическое моделирование.

Макроскопическое моделирование – это возможность рассматривать объект исследования как целостную систему, взаимодействующую с системным окружением. Системное окружение – это совокупность внешних воздействий, влияющих на функционирование системы.

Использование макроскопической модели агрегата позволяет отбросить неосновные функции системы и сосредоточить внимание на основных функциях, определяющих назначение системы.

Как отмечалось в первой главе, для такого технического объекта, как МТА, характерно изменение выходных показателей в результате воздействия случайных входных факторов. Для изучения этого процесса необходимо использовать стохастические модели системы. Для построения такой модели в детерминированную модель вводятся случайные возмущения, подчиняющиеся определенному закону распределения с заданными параметрами. Под случайными возмущениями, вводимыми в модель МТА, подразумеваются переменный крутящий момент M_k на валу двигателя и переменная сила тяги на крюке.

Исходя из поставленной цели исследований: повышение эффективности функционирования МТА за счет использования оптимальных параметров и режимов работы и снижения энергозатрат, общий вид макромоделей агрегата можно представить в следующем виде (рисунок 2.2) [71]:

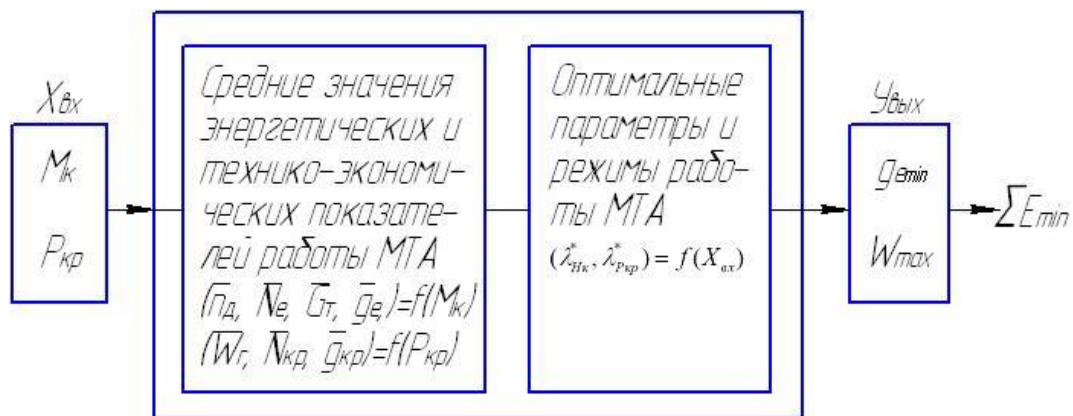


Рисунок 2.2 – Модель оценки эффективности функционирования МТА:

$X_{вх}$ – входные случайные воздействия на МТА (M_k – переменный крутящий момент на валу двигателя, $P_{кр}$ – переменная сила тяги на крюке); $\bar{n}_d, \bar{N}_e, \bar{G}_T, \bar{g}_e, \bar{W}_r, \bar{N}_{кр}, \bar{g}_{кр}$ – соответственно средние значения частоты вращения вала двигателя, эффективной мощности часового расхода топлива, удельного расхода топлива, часовой производительности, тяговой мощности и

удельного тягового расхода топлива; $\lambda_{Mk}^*, \lambda_{Pkp}^*$ – оптимальная степень загрузки двигателя и трактора соответственно; $U_{вых}$ – выходные показатели работы МТА ($g_{e\min}$ – минимальный удельный расход топлива; W_{max} – максимальная производительность); $\Sigma Emin$ – минимальные энергозатраты технологического процесса.

2.2. Вероятностно-статистическая оценка энергетических и технико-экономических показателей МТА при переменном характере внешних воздействий

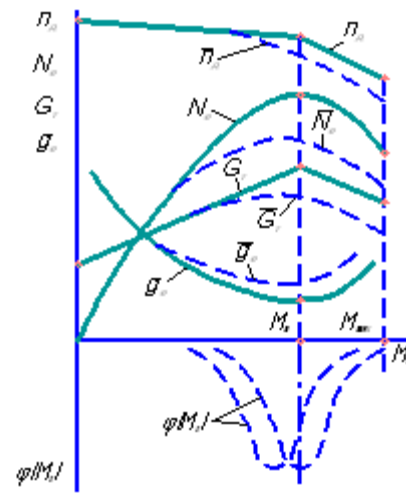
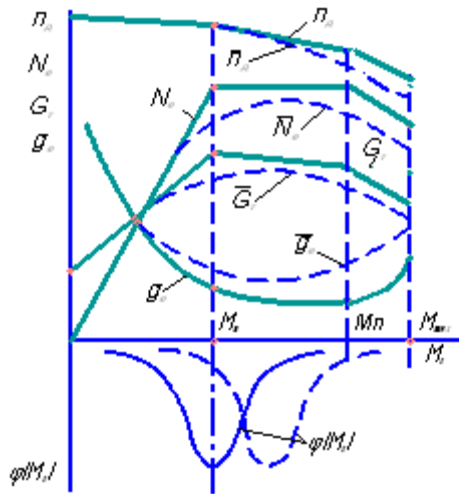
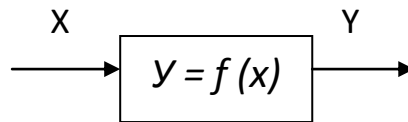
Под воздействием случайных внешних факторов энергетические и технико-экономические показатели МТА также являются случайными величинами и определяются своими вероятностно-статистическими оценками: законами распределения, математическими ожиданиями, дисперсиями, среднеквадратическими отклонениями и др.

При определении эффективности функционирования агрегата в условиях переменных внешних воздействий используется математическая модель типа «вход-выход» (рисунки 2.1, 2.2). Данная модель основывается, как отмечалось ранее, на методе функций случайных аргументов [1]. Входные x_i и выходные y_i величины связаны детерминированными зависимостями $y_i = f(x_i)$ (под y_i подразумеваются мощность дизеля, расход топлива и т.д., а под x_i – переменные внешние факторы). Эти зависимости устанавливаются при аппроксимации стендовых характеристик двигателя и трактора (рисунки 2.3, 2.4). Входные переменные x_i представляют собой случайные величины, изменяющиеся по нормальному закону распределения.

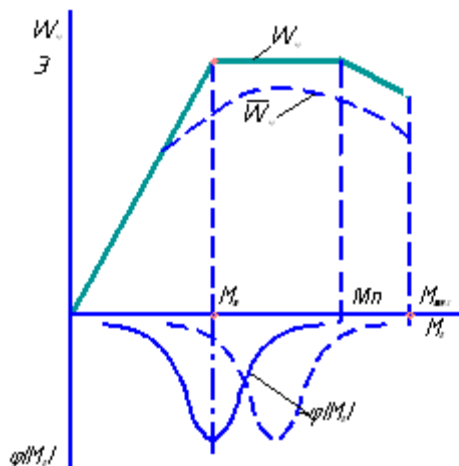
Нормальный закон распределения входной переменной x_i определяется по формуле (2.1) [1, 47, 62], он соответствует условиям эксплуатации агрегатов в реальных условиях:

$$\varphi(x) = (\sigma_x \sqrt{2\pi})^{-1} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma_x^2}}, \quad (2.1)$$

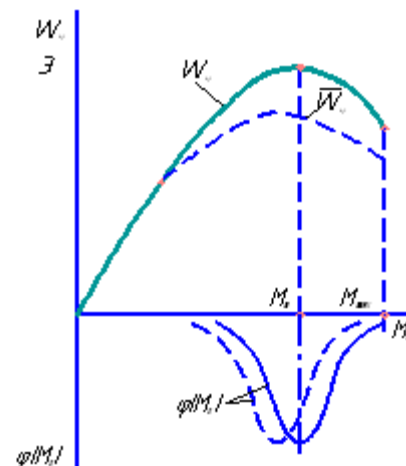
где $\bar{x}_i, \sigma_x, \sigma_x^2$ – соответственно среднее значение, стандарт и дисперсия случайной величины x .



а



б



в

Рисунок 2.3 – 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_q – часовая производительность, га/ч; $\varphi(M_k)$ – плотность распределения крутящего момента на валу дизеля

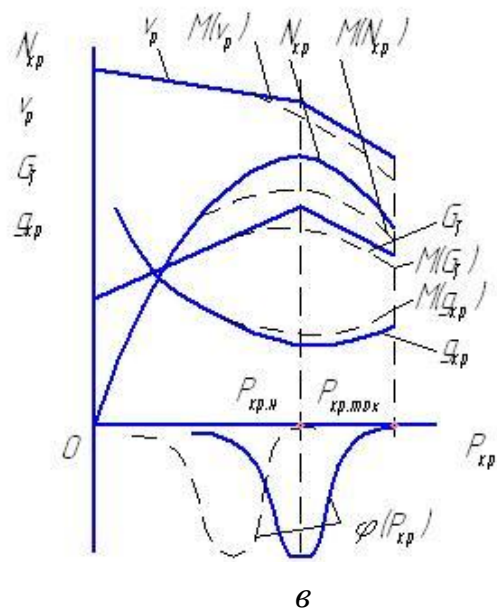
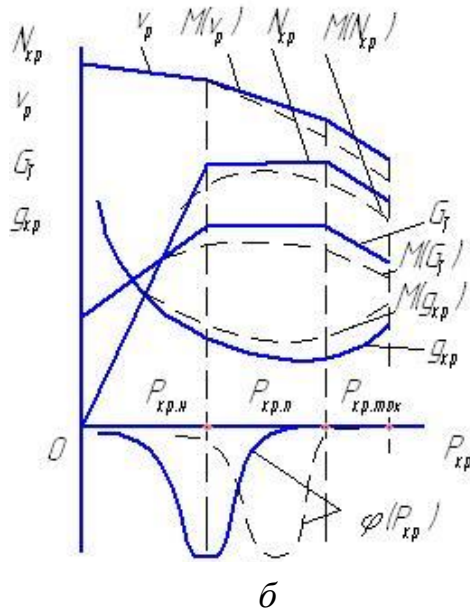
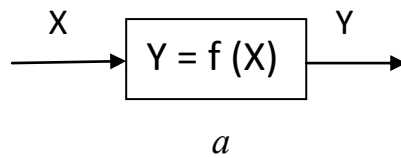


Рисунок 2.4 – Схемы для определения вероятностно – статистических оценок энергетических и технико-экономических показателей МТА при вероятностном характере тяговой нагрузки: а – одномерная модель функционирования МТА; б – показатели МТА при случайном характере колебаний силы тяги на крюке трактора с двигателем постоянной мощности; в – показатели МТА при случайном характере колебаний силы тяги на крюке для типовой тяговой характеристики

На рисунке 2.4: 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); $P_{кр}$ – сила тяги на крюке трактора, кН; $P_{кр.мах}$ – максимальная сила тяги на крюке, соответствующая максимальному крутящему моменту на валу двигателя, кН; $P_{кр.н}$ – номинальная сила тяги на крюке, кН; $P_{кр.п}$ – предельная сила тяги на крюке, соответствующая предельному крутящему моменту на валу двигателя, кН; $M(V_p)$ – математическое ожидание рабочей скорости движения МТА, км/ч; $M(N_{кр})$ – математическое ожидание тяговой мощности, кВт; $M(G_T)$ – математическое ожидание часового расхода топлива, кг/ч; $M(g_{кр})$ – математическое ожидание удельного

тягового расхода топлива, г/(кВт·ч); $\varphi(P_{kp})$ – плотность распределения силы тяги на крюке.

При моделировании гармонических колебаний входной величины x_i в стендовых условиях, а также при математическом моделировании для определения плотности распределения вероятностей случайной величины X используется закон арксинуса, который приемлем при гармоническом нагружении [31] с постоянными амплитудой A_x и частотой f_0 , но со случайной начальной фазой Q_k , равномерно распределенной в интервале $[0, 2\pi]$,

$$\begin{aligned} \varphi(Q_k) &= (2\pi)^{-1} \text{ при } 0 \leq Q_k \leq 2\pi; \\ &0 \text{ при других } Q_k. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Плотность распределения вероятностей величины x_i при законе арксинуса определяется по формуле

$$\begin{aligned} \varphi(x) &= \left\{ \pi [A_x^2 - (x - \bar{x})^2]^{1/2} \right\}^{-1} \text{ при } (x - \bar{x}) \triangleleft A_x \\ &0 \text{ при } (x - \bar{x}) \geq A_x, \end{aligned} \quad (2.3)$$

где $x = \bar{x} + A_x \sin(2\pi f_0 t + Q_k)$;

f_0 – частота колебаний величины x ;

A_x – амплитуда колебаний аргумента x ;

Q_k – начальная фаза гармонических колебаний нагрузки, равномерно распределенная на интервале $[0, 2\pi]$.

Математические ожидания выходных показателей тягового МТА определяются с помощью выражения [1]

$$\bar{y}_i = \int_{-\infty}^{\infty} y_i \cdot \varphi(y_i) dy_i = \int_{-\infty}^{\infty} f(x_i) \varphi(x_i) dx_i, \quad (2.4)$$

где $\varphi(y_i) = \varphi(x) |dx/dy|$ – плотность распределения вероятностей выходной случайной величины;

$f(x)$ – функция связи.

Дисперсии определяются по формуле [1]

$$D(y_i) = \int_{-\infty}^{\infty} (y_i - \bar{y}_i)^2 \varphi(y_i) dy_i = \int_{-\infty}^{\infty} [f(x_i) - \bar{y}_i]^2 \varphi(x_i) dx_i. \quad (2.5)$$

Стандарты и коэффициенты вариации определяются по формулам [3]

$$\sigma_{y_i} = [\mathcal{D}(y_i)]^{1/2}; \quad \gamma_{y_i} = \sigma_{y_i} / \bar{y}_i. \quad (2.6)$$

Уровень использования выходных показателей агрегата на различных режимах работы оценивается вероятностным коэффициентом [1]

$$\lambda_{y_i} = \bar{y}_i / y_{H_i}, \quad (2.7)$$

где \bar{y}_i – математическое ожидание показателя y_i ;

y_{H_i} – номинальное значение показателя y_i .

2.3. Определение математических ожиданий энергетических и технико-экономических показателей МТА в зависимости от колебаний крутящего момента на валу двигателя

В качестве основных энергетических показателей рассматриваем частоту вращения коленчатого вала n_d , часовой расход топлива G_T , эффективную мощность N_e , удельный расход топлива q_e , а в качестве входной величины – крутящий момент на валу двигателя (рисунки 2.3, в). При определении математических ожиданий энергетических показателей двигателя с классической стендовой характеристикой используем выражения (2.10), (2.3), (2.4), а также функции связи $y = f(M_K)$, определяемые при аппроксимации стендовых характеристик [1, 31]:

$$n_d = f(M_K) = \begin{cases} A_1^* + B_1^* M_K & \text{при } M_K \leq M_H \\ A_2^* + B_2^* M_K & \text{при } M_K \geq M_H \end{cases} \quad (2.8)$$

$$G_T = f(M_K) = \begin{cases} A_1 + B_1 M_K & \text{при } M_K \leq M_H \\ A_2 + B_2 M_K & \text{при } M_K \geq M_H \end{cases} \quad (2.9)$$

$$N_e = f(M_K) = \begin{cases} C (A_1^* M_K + B_1^* M_K^2) & \text{при } M_K \leq M_H \\ C (A_2^* M_K + B_2^* M_K^2) & \text{при } M_K \geq M_H \end{cases} \quad (2.10)$$

где $A_1^* = n_x$; $A_2^* = n_H + [(n_H - n_{\min}) / (K - 1)]$; $B_1^* = -(n_x - n_H) / M_H$; $B_2^* = (n_H - n_{\min}) / [M_H (K - 1)]$; $A_1 = G_{TX}$; $A_2 = G_{TH} + [(G_{TH} - G_{TO}) / (K - 1)]$; $B_1 = (G_{TH} - G_{TX}) / M_H$; $B_2 = -(G_{TH} - G_{TO}) / [M_H (K - 1)]$;

$K = M_{\max} / M_H$ – коэффициент приспособляемости;

M_{\max}, M_H – максимальный и номинальный крутящий момент на валу двигателя, кВт;

G_{TH}, G_{TX}, G_{TO} – часовой расход топлива на номинальном режиме, холостом ходу, при максимальном значении крутящего момента, кг/ч;

M_K – текущее значение крутящего момента, кВт;

n_X, n_H, n_{min} – частота вращения вала двигателя соответственно: холостого хода, при номинальном моменте и при максимальном моменте, мин⁻¹;

2.3.1. Математическое ожидание частоты вращения вала двигателя

Математическое ожидание частоты вращения вала двигателя находим по формуле [1, 31]

$$\begin{aligned} \bar{n}_d &= \int_{-\infty}^{\infty} f(M_K) \varphi(M_K) dM_K = \int_{-\infty}^{M_H} f_1(M_K) \varphi(M_K) dM_K + \int_{M_H}^{\infty} f_2(M_K) \varphi(M_K) dM_K = \\ &= 0.5(a^* + b^* \bar{M}_K) - (a_1^* + b_1^* M_K) \cdot \Phi(t_H) + b_1^* \cdot \varphi(t_H) \cdot \sigma_M, \end{aligned} \quad (2.11)$$

где $\Phi(t_H) = (2\pi)^{-1/2} \int_0^{t_H} e^{-t^2/2} dt$ – функция Лапласа [11];

$\varphi(t_H) = (2\pi)^{-1/2} \exp(-0.5t_H^2)$ – плотность распределения вероятностей аргумента $t_H, t_H = (M_H - \bar{M}_K) / \sigma_M$;

\bar{M}_K, σ_M – среднее значение и стандарт крутящего момента;

$a^* = A_1^* + A_2^*; a_1^* = A_2^* - A_1^*; b^* = B_1^* + B_2^*; b_1^* = B_2^* - B_1^*$ – коэффициенты.

2.3.2. Математическое ожидание часового расхода топлива

Математическое ожидание часового расхода топлива находим по формуле [1, 31]

$$\begin{aligned} \bar{G}_T &= (\sigma_M \sqrt{2\pi})^{-1} \left\{ \int_{-\infty}^{M_H} (A_1 + B_1 M_K) \exp\left[-(M_K - \bar{M}_K)^2 / (2\sigma_M^2)\right] dM_K + \right. \\ &\quad \left. + \int_{M_H}^{\infty} (A_2 + B_2 M_K) \exp\left[-(M_K - \bar{M}_K)^2 / 2\sigma_M^2\right] dM_K \right\} = \\ &= 0.5(a + b \bar{M}_K) - (a_1 + b_1 \bar{M}_K) \Phi(t_H) + b_1 \varphi(t_H) \sigma_M. \end{aligned} \quad (2.12)$$

2.3.3. Математическое ожидание эффективной мощности

Математическое ожидание эффективной мощности определяем по формуле [1, 31]

$$\begin{aligned} \bar{N}_e = \frac{C}{\sigma_M \sqrt{2\pi}} \{ \int_{-\infty}^{M_H} (A_1^* M_K + B_1^* M_K^2) \exp[-(M_K - \bar{M}_K)^2 / (2\sigma_M^2)] dM_K + \\ + \int_{M_H}^{\infty} (A_2^* M_K + B_2^* M_K^2) \exp[-(M_K - \bar{M}_K)^2 / (2\sigma_M^2)] dM_K \} = \\ 9550^{-1} \left[0,5(a^* \bar{M}_K + b^* \bar{M}_K^2 + b^* \sigma_M^2) - (a_1^* \bar{M}_K + b_1^* \bar{M}_K^2 + b_1^* \sigma_M^2) \Phi(t_H) \right] + \\ + b_1^* \varphi(t_H) \bar{M}_K \sigma_M \end{aligned} \quad (2.13)$$

2.3.4. Математическое ожидание удельного расхода топлива

Для нахождения математического ожидания удельного расхода топлива используем соотношение

$$\bar{q}_e = \bar{G}_T / \bar{N}_e \cdot 10^3. \quad (2.14)$$

2.3.5. Расчет производительности МТА

Математическое ожидание часовой производительности агрегата (рисунок 2.3, в) рассчитывается с использованием выражения [31]:

$$\bar{W}_q = C_w 9550^{-1} [\bar{M}_K \bar{n}_o + K_{Mn}], \quad (2.15)$$

где $C_w = 0,36 \eta_T \tau K_a^{-1}$;

η_T – тяговый КПД трактора;

K_a – удельное сопротивление агрегата; τ – степень использования времени работы агрегата;

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

$\bar{n}_o = 0,5(a^* + b^* \bar{M}_K) - (a_1^* + b_1^* \bar{M}_K) \Phi(t_H) + b_1^* \varphi(t_H) \sigma_M$ – математическое ожидание частоты вращения вала двигателя, мин^{-1} ;

$K_{Mn} = [0,5b^* - b_1^* \Phi(t_H)] \sigma_M^2$ – корреляционный момент;

$\Phi(t_H)$ и $\varphi(t_H)$ – функции аргумента $t_H = (M_H - \bar{M}_K) / \sigma_M$.

2.4. Определение математических ожиданий энергетических и технико-экономических показателей МТА в зависимости от колебаний крутящего момента на валу двигателя постоянной мощности

2.4.1. Расчет математического ожидания частоты вращения коленчатого вала

При определении математических ожиданий энергетических показателей двигателя постоянной мощности (ДПМ) также используем функции связи $y = f(M_k)$, определяемые при аппроксимации стендовых характеристик (рисунок 2.3, б) [69]: ,

$$n_D = f(M_k) = \begin{cases} f_1(M_k) = (A_1^* + B_1^* M_k) \text{ при } 0 \leq M_k \leq M_H \\ f_2(M_k) = (A_2^* + B_2^* M_k) \text{ при } M_H \leq M_k \leq M_n \\ f_3(M_k) = (A_3^* + B_3^* M_k) \text{ при } M_n \leq M_k \leq M_{max} \end{cases} \quad (2.16)$$

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 2.3, б (таблица 2.1);

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

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

M_H – номинальный крутящий момент, Н·м.

Математические ожидания частоты вращения коленчатого вала с учетом выражений (2.1), (2.3), (2.4) и (2.16) рассчитываются по формуле [77]

$$\begin{aligned} \bar{n}_D = f(M_k) &= (\sigma_M \sqrt{2\pi})^{-1} \left\{ \int_{-\infty}^{M_H} (A_1^* + B_1^* M_k) \exp\left[-(M_k - \bar{M}_k)^2 / (2\sigma_M^2)\right] dM_k + \right. \\ &+ \int_{M_H}^{M_{II}} (A_2^* + B_2^* M_k) \exp\left[-(M_k - \bar{M}_k)^2 / (2\sigma_M^2)\right] dM_k + \\ &+ \left. \int_{M_{II}}^{\infty} (A_3^* + B_3^* M_k) \exp\left[-(M_k - \bar{M}_k)^2 / (2\sigma_M^2)\right] dM_k \right\} = \\ \bar{n}_D = f(M_k) &= 0,5(a^* + b^* \bar{M}_k) + (a_1^* + b_1^* \bar{M}_k) \Phi(\alpha_H) + (a_2^* + b_2^* \bar{M}_k) \Phi(\alpha_{II}) - \\ &- \sigma_M \{ (b_1^* \varphi(\alpha_H) + b_2^* \varphi(\alpha_{II})) \}, \end{aligned} \quad (2.17)$$

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

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

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

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

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

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

$a_1^*, b_1^*, a^*, b^*, a_2^*, b_2^*$ – расчетные коэффициенты, определяемые при аппроксимации характеристики двигателя в зависимости от частоты вращения коленчатого вала (таблица 2.1) [69].

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

σ_M – стандарт крутящего момента, Н·м.

Таблица 2.1 – 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_Π, n_{min} – частота вращения вала двигателя соответственно: холостого хода, при номинальном моменте, при предельном моменте и при максимальном моменте, мин^{-1} ; $\kappa_1 = M_{max}/M_\Pi$; $\kappa_2 = M_\Pi/M_H$.

2.4.2. Расчет математического ожидания эффективной мощности двигателя

Аппроксимация стендовой характеристики двигателя по мощности на рисунке 2.3,б выглядит следующим образом [69]:

$$N_e = f(M_k) = \begin{cases} f_1(M_k) = C(A_1^* M_k + B_1^* M_k^2) \text{ при } 0 \leq M_k \leq M_H \\ f_2(M_k) = C(A_2^* M_k + B_2^* M_k^2) \text{ при } M_{\Pi} \leq M_k \leq M_H \\ f_3(M_k) = C(A_3^* M_k + B_3^* M_k^2) \text{ при } M_H \leq M_k \leq M_{max} \end{cases}, \quad (2.18)$$

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_{Π} – 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 (см. таблицу 2.1).

Математическое ожидание эффективной мощности ДПМ находим с помощью формулы [74]

$$\begin{aligned} \bar{N}_e = f(M_k) &= C / (\sigma_M \sqrt{2\pi}) \left\{ \int_{-\infty}^{M_H} (A_1^* + B_1^* M_k) \exp\left[-(M_k - \bar{M}_k)^2 / (2\sigma_M^2)\right] dM_k \right. \\ &\quad + \int_{M_H}^{M_{\Pi}} (A_2^* + B_2^* M_k) \exp\left[-(M_k - \bar{M}_k)^2 / (2\sigma_M^2)\right] dM_k + \\ &\quad \left. + \int_{M_{\Pi}}^{\infty} (A_3^* + B_3^* M_k) \exp\left[-(M_k - \bar{M}_k)^2 / (2\sigma_M^2)\right] dM_k \right\} = \\ &= c^{-1} \left[0,5(a^* \bar{M}_k + b^* \bar{M}_k^2 + b^* \sigma_M^2) + (a_1^* \bar{M}_k + b_1^* \bar{M}_k^2 + b_1^* \sigma_M^2) \Phi(t_H) + \right. \\ &\quad \left. + (a_2^* \bar{M}_k + b_2^* \bar{M}_k^2 + b_2^* \sigma_M^2) \Phi(t_{\Pi}) - \sigma_M \{b_1^* \varphi(t_H) \bar{M}_k + b_2^* \varphi(t_{\Pi}) \bar{M}_k\} \right], \quad (2.19) \end{aligned}$$

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

\overline{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 ;

$$t_H = \frac{M_H - \overline{M}_\kappa}{\sigma_M}, t_\Pi = \frac{M_\Pi - \overline{M}_\kappa}{\sigma_M};$$

σ_M – стандарт крутящего момента, Н·м;

M_H – номинальное значение крутящего момента, Н·м;

M_Π – 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 (см. таблицу 2.1) [69].

2.4.3. Расчет математического ожидания часового расхода топлива

Для расчета математических ожиданий часового расхода топлива его характеристика на рисунке 2.3,б аппроксимируется с помощью следующего выражения [74]:

$$\begin{aligned} G_T &= f(M_\kappa) = \\ \left\{ \begin{array}{l} f_1(M_\kappa) = (A_1 + B_1 M_\kappa) \text{ при } 0 \leq M_\kappa \leq M_H \\ f_2(M_\kappa) = (A_2 + B_2 M_\kappa) \text{ при } M_\Pi \leq M_\kappa \leq M_H \\ f_3(M_\kappa) = (A_3 + B_3 M_\kappa) \text{ при } M_H \leq M_\kappa \leq M_{\max} \end{array} \right. \quad (2.20) \end{aligned}$$

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 2.2).

Таблица 2.2 – Коэффициенты для расчета математических ожиданий часового расхода топлива трактора с двигателем постоянной мощности

Коэффициент	Расчетная формула
A_1	G_{TX}
A_2	$G_{TH} + \{[G_{TH} - G_{TP}]/(\kappa_2 - 1)\}$
A_3	$G_{TP} + \{(G_{TP} - G_{TO})/(\kappa_1 - 1)\}$
B_1	$-(G_{TX} - G_{TH})/M_H$
B_2	$-(G_{TH} - G_{TP})/(M_n - M_H)$
B_3	$-(G_{TP} - G_{TO})/(M_{max} - M_{\Pi})$
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	$B_2^* - B_3^*$

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

Используя выражения (2.1), (2.3), (2.4), (2.20), получим зависимость для расчета математических ожиданий часового расхода топлива:

$$\begin{aligned}
 \overline{G}_T = f(M_K) = & \left(\sigma_M \sqrt{2\pi} \right)^{-1} \left\{ \int_{-\infty}^{M_H} (A_1 + B_1 M_K) \exp \left[- (M_K - \overline{M}_K)^2 / (2\sigma_M^2) \right] dM_K + \right. \\
 & + \int_{M_H}^{M_{\Pi}} (A_2 + B_2 M_K) \exp \left[- (M_K - \overline{M}_K)^2 / (2\sigma_M^2) \right] dM_K + \\
 & + \left. \int_{M_{\Pi}}^{\infty} (A_3 + B_3 M_K) \exp \left[- (M_K - \overline{M}_K)^2 / (2\sigma_M^2) \right] dM_K \right\} = \\
 = & 0,5(a + b \overline{M}_K) + (a_1 + b_1 \overline{M}_K) \Phi(\alpha_H) + (a_2 + b_2 \overline{M}_K) \Phi(\alpha_{\Pi}) - \\
 & - \sigma_n \{ (b_1 \varphi(\alpha_H) + b_2 \varphi(\alpha_{\Pi})) \},
 \end{aligned} \tag{2.21}$$

где \overline{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 (см. таблицу 2.2);

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

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

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

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

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

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

σ_M – стандарт крутящего момента, Н·м.

Для расчета коэффициентов a_1, b_1, a_2, b_2, a, b значения G_{TO} и $G_{ТП}$ находим по формулам [143]

$$G_{TO} = 3,6 \cdot \frac{N_{e\max} 10^3}{Q_H \cdot \eta_e}, \quad (2.22)$$

$$G_{ТП} = 3,6 \cdot \frac{N_{e.П} \cdot 10^3}{Q_H \cdot \eta_e},$$

где η_e (0,25–0,4) – эффективный КПД двигателя (данная переменная вводится последовательно в заданных пределах);

$$Q_H = 42500 \text{ кДж/кг};$$

$N_{e\max} = 9550^{-1} M_{\max} \times n_{\partial.\min}$ – данная переменная варьируется в пределах $M_{\max} = M_H \times (1,35–1,6)$

$N_{e.П}$ – предельная мощность двигателя, кВт;

$$N_{e.П} = 9550^{-1} M_{II} \times n_{\partial.\min}, \quad M_{II} = M_H \times (1,15–1,3).$$

2.4.4. Расчет математического ожидания удельного расхода топлива

Математическое ожидание удельного расхода топлива находим по формуле

$$\bar{g}_e = 10^{-3} \frac{\bar{G}_T}{\bar{N}_e}, \quad (2.23)$$

где \bar{g}_e – математическое ожидание удельного расхода топлива, г/кВт·ч.

2.4.5. Расчет математического ожидания часовой производительности МТА

Математическое ожидание часовой производительности МТА, представленной на рисунке 2.3, б, определяем следующим образом [31]:

$$\bar{W}_q = C_{w1} [\bar{N}_e], \quad (2.24)$$

где \bar{W}_q – математическое ожидание производительности агрегата, га/ч;

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

η_T – тяговый КПД трактора;

K_a – удельное сопротивление агрегата, кН/м;

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

\bar{N}_e – математическое ожидание эффективной мощности двигателя, кВт.

Математическое ожидание эффективной мощности ДПМ \bar{N}_e в выражении (2.24) находим с помощью формулы (2.19).

2.5. Определение математических ожиданий энергетических и технико-экономических показателей МТА в зависимости от колебаний силы тяги на крюке

Для оценки энергетических и технико-экономических показателей трактора (скорость движения V_p , тяговая мощность на данной передаче $N_{кр}$, часовой расход топлива G_T , удельный тяговый расход топлива на данной передаче $g_{кр}$), находящихся под

воздействием переменной силы тяги на крюке $P_{кр}$, используется тяговая характеристика трактора (рисунок 2.4). При ее аппроксимации устанавливаются зависимости [31]:

$$(V_p, N_{кр}, G_m, g_{кр}) = f(P_{кр}). \quad (2.25)$$

Зависимости (2.25) могут быть получены, исходя из следующей аппроксимации тяговой характеристики трактора с двигателем постоянной мощности и с двигателем, имеющим классическую стендовую характеристику, представленную на рисунке 2.4,б и в.

для двигателя с классической стендовой характеристикой [31]:

$$V_p = f(P_{кр}) = \begin{cases} f_1(P_{кр}) = A_1^* + B_1^* P_{кр} & \text{при } P_{кр} \leq P_{кр.н} \\ f_2(P_{кр}) = A_2^* + B_2^* P_{кр} & \text{при } P_{кр} \geq P_{кр.н} \end{cases}; \quad (2.26)$$

$$G_T = f(P_{кр}) = \begin{cases} f_1(P_{кр}) = A_1' + B_1' P_{кр} & \text{при } P_{кр} \leq P_{кр} \\ f_2(P_{кр}) = A_2' + B_2' P_{кр} & \text{при } P_{кр} \geq P_{кр.н} \end{cases}; \quad (2.27)$$

$$N_e = f(P_{кр}) = \begin{cases} f_1(P_{кр}) = C(A_1^* P_{кр} + B_1^* P_{кр}^2) & \text{при } P_{кр} \leq P_{кр.н} \\ f_2(P_{кр}) = C(A_2^* P_{кр} + B_2^* P_{кр}^2) & \text{при } P_{кр} \geq P_{кр.н} \end{cases}, \quad (2.28)$$

где $f_1(P_{кр})$ – функция связи, соответствующая работе двигателя на регуляторе;

$f_2(P_{кр})$ – функция связи, характеризующая работу двигателя в режиме перегрузки;

$f(P_{кр})$ – функция связи, установленная при аппроксимации характеристики трактора на данной передаче;

$$A_1^* = V_x; \quad A_2^* = V_{р.н} + [(V_{р.н} - V_{\min}) / (K_1 - 1)];$$

$$B_1^* = -(V_x - V_{р.н}) / P_{кр.н}; \quad B_2^* = -(V_{р.н} - V_{\min}) / [P_{кр.н} (K_1 - 1)] - \text{коэффициенты, определяемые по типовой характеристике трактора;}$$

$$A_1' = G_{ТХ}; \quad A_2' = G_{ТН} + [(G_{ТН} - G_{ТО}) / (K_1 - 1)]; \quad B_1' = (G_{ТН} - G_{ТХ}) / P_{кр.н};$$

$$B_2' = -(G_{ТН} - G_{ТО}) / [P_{кр.н} (K_1 - 1)]; \quad K_1 = \frac{P_{\max}}{P_{кр.н}}; \quad G_{ТХ}, G_{ТО}, G_{ТН}, P_{\max}, P_{кр.н} -$$

данные тяговой характеристики трактора.

$P_{кр.н}$ – номинальная сила тяги, кН;

для двигателя постоянной мощности [74]:

$$\bar{V}_p = \begin{cases} f_1(P_{kp}) = A_1 + B_1 P_{kp} \text{ при } 0 \leq P_{kp} \leq P_{kp.n}; \\ f_2(P_{kp}) = A_2 + B_2 P_{kp} \text{ при } P_{kp.n} < P_{kp} \leq P_{kp.n}; \\ f_3(P_{kp}) = A_3 + B_3 P_{kp} \text{ при } P_{kp.n} < P_{kp} \leq P_{kp.max}, \end{cases} \quad (2.29)$$

где \bar{V}_p – среднее значение рабочей скорости трактора, км/ч;

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

P_{kp} – сила тяги на крюке, кН;

$P_{kp.п}$ – предельная сила тяги, соответствующая максимальной тяговой мощности, кН;

$P_{kp.n}$ – номинальная сила тяги, кН;

$P_{kp.max}$ – максимальная сила тяги, кН;

$A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3$ – постоянные величины и угловые коэффициенты, определяемые по тяговой характеристике трактора (таблица 2.3).

Таблица 2.3 – Коэффициенты для расчета математических ожиданий тяговой мощности трактора с двигателем постоянной мощности

Коэффициент	Расчетная формула
A_1	$V_{p.x}$
A_2	$V_{p.n} + \{[V_{p.n} - V_{p.п}]/(\kappa_2 - 1)\}$
A_3	$V_{p.п} + \{(V_{p.п} - V_{p.min})/(\kappa_1 - 1)\}$
B_1	$-(V_{p.x} - V_{p.n})/P_{kp.n}$
B_2	$-(V_{p.n} - V_{p.п})/(P_{kp.п} - P_{kp.n})$
B_3	$-(V_{p.п} - V_{p.min})/(P_{kp.max} - P_{kp.п})$
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	$B_2 - B_3$

$V_{p.x}, V_{p.n}, V_{p.п}, V_{p.min}$ – скорость движения трактора соответственно: холостого хода, номинальная, при $P_{kp.п}$ и при $P_{kp.max}$, км/ч; $\kappa_1 = P_{kp.max}/P_{kp.n}$; $\kappa_2 = P_{kp.п}/P_{kp.n}$.

Характеристика тяговой мощности трактора (рисунок 2.4,б) аппроксимируется с помощью следующего выражения [71]:

$$\bar{N}_{kp} = \begin{cases} f_1(P_{kp}) = A_1 P_{kp} + B_1 P_{kp}^2 \text{ при } 0 \leq P_{kp} \leq P_{kp.н}; \\ f_2(P_{kp}) = A_2 P_{kp} + B_2 P_{kp}^2 \text{ при } P_{kp.н} < P_{kp} \leq P_{kp.п}; \\ f_3(P_{kp}) = A_3 P_{kp} + B_3 P_{kp}^2 \text{ при } P_{kp.п} < P_{kp} \leq P_{kp.max}, \end{cases} \quad (2.30)$$

где $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3$ – постоянные величины и угловые коэффициенты, определяемые по тяговой характеристике трактора (таблица 2.4).

Аппроксимация характеристики часового расхода топлива (рисунок 2.4,б) производится с помощью выражения [74]

$$\bar{G}_T = \begin{cases} f_1(P_{kp}) = A_1^* + B_1^* P_{kp} \text{ при } 0 \leq P_{kp} \leq P_{kp.н}; \\ f_2(P_{kp}) = A_2^* + B_2^* P_{kp} \text{ при } P_{kp.н} < P_{kp} \leq P_{kp.п}; \\ f_3(P_{kp}) = A_3^* + B_3^* P_{kp} \text{ при } P_{kp.п} < P_{kp} \leq P_{kp.max}, \end{cases} \quad (2.31)$$

где $A_1^*, B_1^*, A_2^*, B_2^*, A_3^*, B_3^*$ – расчетные коэффициенты, определяемые по тяговой характеристике трактора (см. таблицу 2.4).

Таблица 2.4 – Коэффициенты для расчета математических ожиданий часового расхода топлива трактора с двигателем постоянной мощности

Коэффициент	Расчетная формула
A_1^*	G_{TX}
A_2^*	$G_{TH} + \{[G_{TH} - G_{ТП}]/(\kappa_2 - 1)\}$
A_3^*	$G_{ТП} + \{(G_{ТП} - G_{ТО})/(\kappa_1 - 1)\}$
B_1^*	$-(G_{TX} - G_{TH})/P_{kp.н}$
B_2^*	$-(G_{TH} - G_{ТП})/(P_{kp.п} - P_{kp.н})$
B_3^*	$-(G_{ТП} - G_{ТО})/(P_{kp.max} - P_{kp.п})$
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^*	$B_2^* - B_3^*$

$G_{TX}, G_{TH}, G_{ТП}, G_{ТО}$ – часовой расход топлива соответственно: холостого хода, номинальный, для предельного крутящего момента, при максимальном крутящем моменте, кг/ч; $\kappa_1 = P_{kp.max}/P_{kp.п}$; $\kappa_2 = P_{kp.п}/P_{kp.н}$.

2.5.1. Расчет математического ожидания рабочей скорости движения агрегата на данной передаче

Скорость движения на данной передаче с использованием выражений (2.1), (2.3), (2.4), (2.29) находим по формуле [74]

$$\begin{aligned}\bar{V}_P = f(P_{кр}) &= (\sigma_P \sqrt{2\pi})^{-1} \left\{ \int_{-\infty}^{P_{кр.н}} (A_1^* + B_1^* P_{кр}) \exp\left[-(P_{кр} - \bar{P}_{кр})^2 / (2\sigma_P^2)\right] dP_{кр} + \right. \\ &+ \int_{P_{кр.н}}^{P_{кр.п}} (A_2^* + B_2^* P_{кр}) \exp\left[-(P_{кр} - \bar{P}_{кр})^2 / (2\sigma_P^2)\right] dP_{кр} + \\ &+ \left. \int_{P_{кр.п}}^{\infty} (A_3^* + B_3^* P_{кр}) \exp\left[-(P_{кр} - \bar{P}_{кр})^2 / (2\sigma_P^2)\right] dP_{кр} \right\} = \\ \bar{V}_P = f(P_{кр}) &= 0,5(a^* + b^* \bar{P}_{кр}) + (a_1^* + b_1^* \bar{P}_{кр})\Phi(\alpha_H) + (a_2^* + b_2^* \bar{P}_{кр})\Phi(\alpha_{II}) - \\ &- \sigma_P \{ (b_1^* \varphi(\alpha_H) + b_2^* \varphi(\alpha_{II})) \},\end{aligned}\quad (2.32)$$

где a_1, b_1, a, b, a_2, b_2 – расчетные коэффициенты, определяемые при аппроксимации тяговой характеристики трактора (таблица 2.3);

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

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

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

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

$$\alpha_{II} = \frac{P_{кр.п} - \bar{P}_{кр}}{\sigma_P}, \alpha_H = \frac{P_{кр.н} - \bar{P}_{кр}}{\sigma_P};$$

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

σ_P – стандарт силы тяги, кН.

2.5.2. Расчет математического ожидания крюковой мощности

Для трактора с двигателем постоянной мощности значение тяговой мощности, исходя из зависимостей (2.1), (2.3), (2.4) и (2.30), находим по следующему выражению [74]:

$$\begin{aligned} \bar{N}_{кр} = f(P_{кр}) &= C / (\sigma_P \sqrt{2\pi}) \left\{ \int_{-\infty}^{P_{кр.н}} (A_1^* + B_1^* P_{кр}) \exp\left[-(P_{кр} - \bar{P}_{кр})^2 / (2\sigma_P^2)\right] dP_{кр} \right. \\ &+ \int_{P_{кр.н}}^{P_{кр.н}} (A_2^* + B_2^* P_{кр}) \exp\left[-(P_{кр} - \bar{P}_{кр})^2 / (2\sigma_P^2)\right] dP_{кр} + \\ &+ \left. \int_{P_{кр.н}}^{\infty} (A_3^* + B_3^* P_{кр}) \exp\left[-(P_{кр} - \bar{P}_{кр})^2 / (2\sigma_P^2)\right] dP_{кр} \right\} = \\ &= \left[0,5(a_1 \bar{P}_{кр} + b_1 \bar{P}_{кр}^2 + b_1 \sigma_P^2) + (a_1 \bar{P}_{кр} + b_1 \bar{P}_{кр}^2 + b_1 \sigma_P^2) \Phi(t_n) + \right. \\ &\left. + (a_2 \bar{P}_{кр} + b_2 \bar{P}_{кр}^2 + b_2 \sigma_P^2) \Phi(t_n) - \sigma_P \{b_1 \varphi(t_n) \bar{P}_{кр} + b_2 \varphi(t_n) \bar{P}_{кр}\} \right], \quad (2.33) \end{aligned}$$

где $\bar{N}_{кр}$ – математическое ожидание тяговой мощности, кВт;

a_1, b_1, a, b, a_2, b_2 – расчетные коэффициенты, определяемые при аппроксимации тяговой характеристики трактора (см. таблицу 2.3);

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

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

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

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

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

$$t_n = \frac{P_{кр.н} - \bar{P}_{кр}}{\sigma_P}; \quad t_n = \frac{P_{кр.н} - \bar{P}_{кр}}{\sigma_P};$$

σ_P – стандарт силы тяги трактора, кН.

2.5.3. Расчет математического ожидания часового расхода топлива на данной передаче

Математические ожидания часового расхода топлива \bar{G}_T определяются с помощью выражений (2.1), (2.3), (2.4), (2.31) [74]:

$$\begin{aligned}\bar{G}_T = f(P_{кр}) &= (\sigma_P \sqrt{2\pi})^{-1} \left\{ \int_{-\infty}^{P_{кр.н}} (A_1 + B_1 P_{кр}) \exp\left[-(P_{кр} - \bar{P}_{кр})^2 / (2\sigma_P^2)\right] dP_{кр} + \right. \\ &+ \int_{P_{кр.н}}^{P_{кр.п}} (A_2 + B_2 P_{кр}) \exp\left[-(P_{кр} - \bar{P}_{кр})^2 / (2\sigma_P^2)\right] dP_{кр} + \\ &+ \left. \int_{P_{кр.п}}^{\infty} (A_3 + B_3 P_{кр}) \exp\left[-(P_{кр} - \bar{P}_{кр})^2 / (2\sigma_P^2)\right] dP_{кр} \right\} = \\ \bar{G}_T &= 0,5(a^* + b^* \bar{P}_{кр}) + (a_1^* + b_1^* \bar{P}_{кр})\Phi(t_n) + (a_2^* + b_2^* \bar{P}_{кр})\Phi(t_n) - \\ &- \sigma_P \{(b_1^* \varphi(t_n) + b_2^* \varphi(t_n))\},\end{aligned}\quad (2.34)$$

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

$a_1^*, b_1^*, a_2^*, b_2^*, a^*, b^*$ – расчетные коэффициенты, определяемые при аппроксимации тяговой характеристики трактора (см. рисунок 2.4,б) по расходу топлива (см. таблицу 2.4).

2.5.4. Расчет математического ожидания удельного тягового расхода топлива

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

$$\bar{g}_e = 10^3 \frac{\bar{G}_T}{\bar{N}_{кр}}, \quad (2.35)$$

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

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

2.5.5. Расчет математического ожидания производительности агрегата

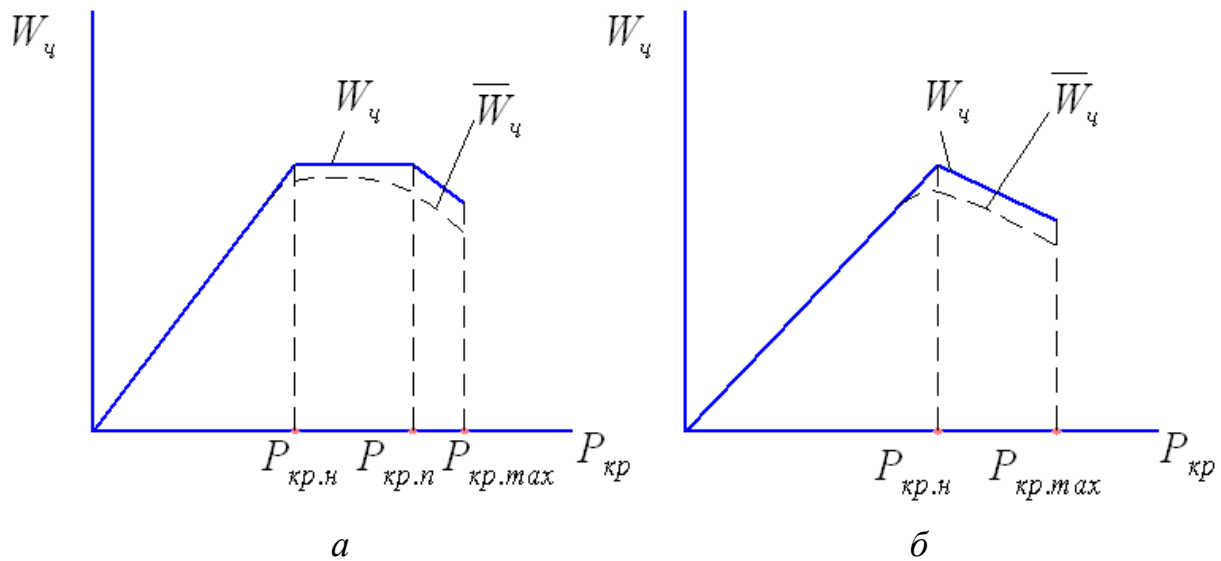


Рисунок 2.5 – К расчету часовой производительности МТА с использованием тяговой характеристики трактора: а) – производительность МТА при случайном характере колебаний силы тяги на крюке трактора с двигателем постоянной мощности; б) – производительность МТА при случайном характере колебаний силы тяги на крюке для типовой тяговой характеристики

На рисунке 2.5: W_q – часовая производительность, га/час; $\overline{W_q}$ – математическое ожидание часовой производительности, га/час; P_{kp} – сила тяги на крюке трактора, кН; $P_{kp.max}$ – максимальная сила тяги на крюке, соответствующая максимальному крутящему моменту на валу двигателя, кН; $P_{kp.n}$ – номинальная сила тяги на крюке, кН; $P_{kp.n}$ – предельная сила тяги на крюке, соответствующая предельному крутящему моменту на валу двигателя, кН.

Для расчета математических ожиданий часовой производительности МТА в зависимости от переменной силы тяги трактора (рисунок 2.5, а, б) используется следующее выражение [31]:

$$\overline{W_q} = C_{w2} [\overline{N_{kp}}], \quad (2.36)$$

где $\overline{W_q}$ – математическое ожидание производительности агрегата, га/ч;

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

K_a – удельное сопротивление агрегата, кН/м;

τ – степень использования времени работы агрегата;

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

Математическое ожидание тяговой мощности в формуле (2.36) находим с помощью выражения (2.33) или выражения (2.37).

2.5.6. Расчет математических ожиданий энергетических показателей МТА с классической тяговой характеристикой трактора

Влияние колебаний силы тяги на тяговую мощность трактора с характеристикой, представленной на рисунке 2.4,в, оценивается с помощью формулы [31]

$$\bar{N}_{kp} = \bar{P}_{kp} \bar{V}_P + K_{pv}, \quad (2.37)$$

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

$\bar{V}_p = 0,5(a^* + b^* \bar{P}_{kp}) - (a_1^* + b_1^* \bar{P}_{kp})\phi(t_H) + b_1^* \phi(t_H)\sigma_p$ – математическое ожидание рабочей скорости движения трактора на данной передаче (рисунк 2.4, в), м/с;

$K_{pv} = [0,5b^* - b_1^* \Phi(t_H)]\sigma_p^2$ – корреляционный момент;

$A_1^* = V_x$; $A_2^* = V_{p.n} + [(V_{p.n} - V_{\min}) / (K_1 - 1)]$;

$B_1^* = -(V_x - V_{p.n}) / P_{kp.n}$;

$B_2^* = -(V_{p.n} - V_{\min}) / [P_{kp.n} (K_1 - 1)]$ – коэффициенты, определяемые по типовой характеристике трактора;

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

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

$\Phi(t_n)$ и $\phi(t_n)$ – функции аргумента $t_n = (P_{kp.n} - \bar{P}_K) / \sigma_p$;

$\bar{P}_{k.p}$, σ_p – среднее значение и среднеквадратическое отклонение тяговой силы трактора на данной передаче, кН;

$P_{kp.n}$ – номинальное значение силы тяги, P_{\max} – максимальное значение силы тяги, кН.

Для расчета математического ожидания удельного тягового расхода топлива \bar{g}_{kp} используется соотношение [31]

$$\bar{g}_{кр} = 10^3 \bar{G}_T / \bar{N}_{кр}, \quad (2.38)$$

где $\bar{G}_T = 0,5(a' + b'\bar{P}_{кр}) - (a'_1 + b'_1\bar{P}_{кр})\Phi(t_n) + b'_1\varphi(t_n)\sigma_P$ – математическое ожидание секундного расхода топлива на данной передаче, кг/ч.

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

$a' = A'_1 + A'_2, a'_1 = A'_2 - A'_1, b' = B'_1 + B'_2, b'_1 = B'_2 - B'_1$ – коэффициенты, определяемые по типовой тяговой характеристике;

$A'_1 = G_{ТХ}$; $A'_2 = G_{ТН} + [(G_{ТН} - G_{ТО}) / (K_1 - 1)]$; $B'_1 = (G_{ТН} - G_{ТХ}) / P_{кр.н}$;
 $B'_2 = -(G_{ТН} - G_{ТО}) / [P_{кр.н} (K_1 - 1)]$; $K_1 = \frac{P_{\max}}{P_{кр.н}}$; $G_{ТХ}, G_{ТО}, G_{ТН}, P_{\max}, P_{кр.н}$ – данные тяговой характеристики трактора.

2.6. Оценка влияния переменных внешних факторов на энергетические затраты работы МТА

Величина суммарных энергетических затрат зависит от многих факторов. В значительной степени на энергозатраты влияет производительность агрегата, которая зависит от различных показателей:

коэффициент использования времени смены;

мощность двигателя трактора;

тяговая характеристика трактора;

скорость выполнения технологических операций и т.д.

В число факторов, влияющих на энергозатраты работы агрегата, входят энергетические факторы:

мощность двигателя и степень ее использования;

допустимая нагрузка двигателя;

расход топлива;

тяговая мощность трактора и др.

Различные методики определения энергетических затрат не учитывают, как правило, такие закономерности работы МТА, как вероятностный характер внешних воздействий, колебания нагрузки, особенности выполнения технологических операций.

Например, в работе [120] энергетические затраты технологического процесса определяются по следующему выражению:

$$E_{\text{ТП}} = E_{\text{П}} + E_0 + (E_{\text{жс}} + E_T + E_c + E_{\text{м}}) \cdot W_{\text{ч}}^{-1}, \quad (2.39)$$

где E_{Π} – прямые топливно-энергетические затраты, кДж/га;

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

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

E_t , E_c и E_m – энергоемкость трактора, сцепки и рабочей машины, МДж/ч;

W_q – часовая производительность МТА, га/ч.

В данном выражении с проблемой эффективности использования МТА связаны прямые топливно-энергетические затраты E_{Π} и производительность W_q . Однако влияние воздействующих на агрегат переменных факторов данная методика не учитывает.

Другой автор [158] предлагает определять суммарные энергозатраты с помощью следующей обобщенной формулы:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{u.mp.} + \mathcal{E}_{u.cxm} + \mathcal{E}_{u.np.} + \mathcal{E}_{p.to} + \mathcal{E}_{c.p} + \mathcal{E}_{ynp} + \mathcal{E}_{TCM} + \mathcal{E}_{nom} \rightarrow \min, \quad (2.40)$$

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

\mathcal{E}_u – энергия, затраченная на изготовление трактора, орудия, прицепа, МДж/га;

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

$\mathcal{E}_{c.p}$ – энергия, затраченная на комплектование МТА, МДж/га;

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

\mathcal{E}_{TCM} – энергия топливно-смазочных материалов, мДж/га.

\mathcal{E}_{nom} – потери энергии, обусловленные несоблюдением оптимальных параметров и режимов работы агрегата, мДж/га.

Выражение (2.40) имеет две составляющие (\mathcal{E}_{TCM} и \mathcal{E}_{nom}), которые определяются автором с учетом оптимальных показателей использования МТА, установленных в работах [1–31]. Тем не менее, данная методика может быть усовершенствована путем применения более эффективных методов оптимизации параметров и режимов работы агрегатов.

В ряде исследований [14, 63–67, 169] установлено, что в реальных условиях фактические энергозатраты технологического процесса значительно превышают расчетные, при этом разница тем больше, чем больше размах колебаний входных воздействий на МТА.

Для оценки влияния переменных внешних факторов работы агрегата на прямые топливно-энергетические затраты в работе [14] используется следующее выражение:

$$\bar{E}_\Pi = (\bar{G}_T \cdot t_p \cdot \alpha_T) / \bar{W}_\Pi + [(G_{TX} \cdot t_x + G_{TO} \cdot t_0) \cdot \alpha_T] / \bar{W}_\Pi, \quad (2.41)$$

где \bar{E}_Π – математическое ожидание прямых топливно-энергетических затрат, кДж/га;

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

α_T – энергетический эквивалент дизельного топлива, МДж/кг;

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

G_{TX} и G_{TO} – 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, н · м.

Известно, что в зависимости от вида технологических операций величина топливно-энергетических затрат на холостые ходы и остановки находится в пределах 10–15% [14, 16, 62–66, 169].

После ряда преобразований выражение (2.41) для расчета основных прямых топливно-энергетических затрат принимает следующий вид [14]:

$$\bar{E}_{опр} = \frac{C_E \cdot \bar{G}_T}{N_e}, \quad (2.42)$$

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

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

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

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

η_T – тяговый КПД трактора на рабочем режиме;

τ – коэффициент использования времени смены;

$\overline{N_e} = f(\overline{M_c})$ – математическое ожидание эффективной мощности дизеля, кВт;

$\overline{N_{кр}} = f(\overline{P_{кр}})$ – математическое ожидание тяговой мощности трактора, кВт.

$\overline{M_c}$ – среднее значение момента сопротивления на коленчатом валу двигателя трактора, $\text{н} \cdot \text{м}$.

$\overline{P_{кр}}$ – среднее значение силы тяги на крюке, кН.

Анализ структуры энергозатрат на производство продукции растениеводства показывает, что она имеет три основных составляющих [160]:

экологическая энергия $E_{\text{э}}$;

антропогенная энергия $E_{\text{ан}}$;

энергия питания почвы $E_{\text{п}}$.

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

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 учетом 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, т.е. увеличиваются потери энергии урожая и общее количество энергозатрат процесса производства сельскохозяйственной продукции. Поэтому при повышении эффективности использования МТА с учетом энергозатрат технологического процесса необходимо учитывать спектр факторов, влияющих на обе составляющие процесса и разработать обобщающий критерий, который объединяет и прямые затраты, и потери энергии урожая $E_{\text{ном}}$.

Энергия, потерянная через урожай, может быть определена следующим образом [162]:

$$E_{nom} = E_A + E_y, \quad (2.43)$$

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

$$E_{mta} = E_{OIP} + E_A, \quad (2.44)$$

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

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

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

Основные прямые энергозатраты E_{OIP} определяются по соотношению (2.42). В данном выражении мощность \bar{N}_e рассчитывается по формулам (2.13), (2.19). Средний часовой расход топлива \bar{G}_T рассчитывается по формулам (2.12), (2.21), (2.34). Тяговая мощность трактора $\bar{N}_{кр}$ рассчитывается по выражениям (2.33), (2.37).

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 в работах [156–158] предлагается использовать выражение

$$E_A = \frac{\sum_{i=1}^{N_i-1} (C_{Pi} \cdot \bar{W}_q \cdot T_{cm} \cdot n_{cm}) + N^1 \cdot C_{Pi} \cdot \bar{W}_q \cdot T_{cm} \cdot n_{cm}}{S_0}, \quad (2.45)$$

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

$$C_{Pi} = Y \cdot \Delta y \cdot Q / 100, \quad (2.46)$$

где Y – планируемая урожайность, кг/га;

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

N_i – число целых дней в N^1 ;

S_0 – объем работы на данной операции, га,

\bar{W}_q – среднее значение производительности агрегата, га/ч;

Q – энергоемкость одного килограмма продукта, МДж/кг.

$$N^1 = \frac{S_0}{\bar{W}_q \cdot T_{см} \cdot n_{см}}, \quad (2.47)$$

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

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

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

Значения Δy устанавливаются с учетом условий природно-климатических зон, либо могут быть приняты по следующей таблице [156–158]:

Таблица 2.5 – Уменьшение потерь урожая Δy на 1 день сокращения периода полевых работ, %

Вид работы	Δy	Культура	Δy	
			посев	уборка
Лушение 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

Определение величины потерь энергии E_A с использованием выражения (2.45) необходимо осуществлять путем сравнения базового значения производительности W_b , которое соответствует номинальному режиму работы МТА, и оптимального значения $W_{опт}$, которое соответствует оптимальному режиму работы агрегата с учетом негативного влияния колебаний внешней погрузки.

Базовое значение производительности МТА W_b и оптимальное значение $W_{опт}$ необходимо в данном случае определять по выражениям [161, 162]:

$$\overline{W}_q = C_w \cdot \overline{N}_e, \quad (2.48)$$

где $C_w = 0,36 \cdot \eta_T \cdot \tau \cdot K_a^{-1}$;

\overline{N}_e – среднее значение мощности дизеля, кВт.

$$\overline{W}_q = C_{w2} [\overline{N}_{KP}], \quad (2.49)$$

где \overline{W}_q – математическое ожидание производительности агрегата, га/ч;

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

K_a – удельное сопротивление агрегата, кН/м;

τ – степень использования времени работы агрегата;

\overline{N}_{KP} – математическое ожидание тяговой мощности, кВт.

Коэффициент, учитывающий степень влияния переменного крутящего момента на производительность МТА, определяется по формуле

$$\lambda_{\overline{W}_q} = \overline{W}_q^* / \overline{W}_{q_n}, \quad (2.50)$$

где \overline{W}_q^* – среднее значение часовой производительности, соответствующее оптимальному нагрузочному режиму двигателя, га/ч;

\overline{W}_{q_n} – среднее значение часовой производительности агрегата в области номинального режима.

Оптимальное и базовое значения топливно-энергетических затрат $g_{опт}$ и $g_{об}$ с учетом переменных внешних воздействий на агрегат определяются по выражению [161, 162]:

$$\overline{g}_e = \overline{G}_T / \overline{N}_e, \quad (2.51)$$

где \overline{g}_e – среднее значение удельного расхода топлива, г/кВт·ч;

\overline{G}_T – средний часовой расход топлива, кг/ч;

\overline{N}_e – среднее значение мощности дизеля, кВт.

Коэффициент, учитывающий степень влияния переменного крутящего момента на удельный расход топлива g_e , определяется по формуле

$$\lambda^* \overline{g}_e = \overline{g}_e^* / \overline{g}_{en}, \quad (2.52)$$

где \bar{g}_e^* – среднее значение удельного расхода топлива, соответствующее оптимальному нагрузочному режиму двигателя, г/кВт·ч;

\bar{g}_{en} – среднее значение удельного расхода топлива в области номинального режима, г/кВт·ч.

2.7. Методика расчета энергетической эффективности использования мобильных машинно-тракторных агрегатов

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 [160]. Методика снижения энергозатрат при использовании машинно-тракторных агрегатов (МТА) за счет оптимизации параметров и режимов их работы основывается на методе оценки влияния переменных внешних воздействий на производительность и расход топлива при работе МТА на режиме рабочего хода.

Математическое ожидание часовой производительности МТА определяем следующим образом [1]:

$$M(W_q) = C_{w1} [M(N_e)], \quad (2.53)$$

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

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

η_T – тяговый КПД трактора;

K_a – удельное сопротивление агрегата, кН/м;

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

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

Математическое ожидание эффективной мощности двигателя в выражении (2.53) находим с помощью формулы [69]

$$M(N_e) = f(M_k) = 9550^{-1} \left[\begin{aligned} &0,5(a \bar{M}_k + b \bar{M}_k^2 + b \sigma_M^2) + \\ &(a_1 \bar{M}_k + b_1 \bar{M}_k^2 + b_1 \sigma_M^2) \Phi(t_H) + \\ &+ (a_2 \bar{M}_k + b_2 \bar{M}_k^2 + b_2 \sigma_M^2) \Phi(t_{II}) - \\ &- \sigma_M \{b_1 \varphi(t_H) \bar{M}_k + b_2 \varphi(t_{II}) \bar{M}_k\} \end{aligned} \right], \quad (2.54)$$

где \bar{M}_k – 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 $Y = f(M_k)$;

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

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

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

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

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 (см. таблицу 2.1).

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

$$\begin{aligned} \bar{G}_T = &0,5(a^* + b^* \bar{M}_k) + (a_1^* + b_1^* \bar{M}_k) \Phi(t_H) + \\ &+ (a_2^* + b_2^* \bar{M}_k) \Phi(t_{II}) - \sigma_P \{ (b_1^* \varphi(t_H) + b_2^* \varphi(t_{II})) \}, \end{aligned} \quad (2.55)$$

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

$a_1^*, b_1^*, a_2^*, b_2^*, a^*, b^*$ – расчетные коэффициенты, определяемые при аппроксимации тяговой характеристики трактора по расходу топлива (см. таблицу 2.2).

Для расчета математических ожиданий часовой производительности МТА в зависимости от переменной силы тяги трактора используется следующее выражение [31]:

$$M(W_{\text{ч}}) = C_{w2} [M(N_{KP})], \quad (2.56)$$

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

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

K_a – удельное сопротивление агрегата, кН/м;

τ – степень использования времени работы агрегата;

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

Математическое ожидание тяговой мощности в выражении находим следующим образом [74]:

$$M(N_{KP}) = f(P_{KP}) = \left[\begin{aligned} &0,5(a^{\circ} \bar{P}_{KP} + b^{\circ} \bar{P}_{KP}^2 + b^{\circ} \sigma_P^2) + \\ &+ (a_1^{\circ} \bar{P}_{KP} + b_1^{\circ} \bar{P}_{KP}^2 + b_1^{\circ} \sigma_P^2) \Phi(\beta_H) + \\ &+ (a_2^{\circ} \bar{P}_{KP} + b_2^{\circ} \bar{P}_{KP}^2 + b_2^{\circ} \sigma_P^2) \Phi(\beta_{\Pi}) - \\ &- \sigma_P \{b_1^{\circ} \varphi(\beta_H) \bar{P}_{KP} + b_2^{\circ} \varphi(\beta_{\Pi}) \bar{P}_{KP}\} \end{aligned} \right], \quad (2.57)$$

где $\Phi(\beta_{\Pi}) = (2\pi)^{-1/2} \int_0^{\beta_{\Pi}} e^{-\beta^2/2} d\beta$ – функция Лапласа для аргумента β_{Π} ;

$\Phi(\beta_H) = (2\pi)^{-1/2} \int_0^{\beta_H} e^{-\beta^2/2} d\beta$ – функция Лапласа для аргумента β_H ;

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

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

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

σ_P – стандарт силы тяги трактора;

$$\beta_{\Pi} = \frac{P_{KP.\Pi} - \bar{P}_{KP}}{\sigma_P}, \quad \beta_H = \frac{P_{KP.H} - \bar{P}_{KP}}{\sigma_P};$$

$a_1^\circ, b_1^\circ, a_2^\circ, b_2^\circ$ – расчетные коэффициенты, определяемые при аппроксимации тяговой характеристики трактора (таблица 2.6);

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

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

Таблица 2.6 – Коэффициенты для расчета математических ожиданий тяговой мощности трактора с двигателем постоянной мощности

Коэффициент	Расчетная формула
A_1°	$V_{р.х}$
A_2°	$V_{р.н} + \{[V_{р.н} - V_{р.п}]/(\kappa_2 - 1)\}$
A_3°	$V_{р.п} + \{(V_{р.п} - V_{р.мин})/(\kappa_1 - 1)\}$
B_1°	$-(V_{р.х} - V_{р.н})/P_{кр.п}$
B_2°	$-(V_{р.п} - V_{р.н})/(P_{кр.п} - P_{кр.н})$
B_3°	$-(V_{р.п} - V_{р.мин})/(P_{кр.макс} - P_{кр.п})$
a°	$A_1^\circ + A_3^\circ$
a_1°	$A_1^\circ - A_2^\circ$
a_2°	$A_2^\circ - A_3^\circ$
b°	$B_1^\circ + B_3^\circ$
b_1°	$B_1^\circ - B_2^\circ$
b_2°	$B_2^\circ - B_3^\circ$

$V_{р.х}, V_{р.н}, V_{р.п}, V_{р.мин}$ – скорость движения трактора соответственно: холостого хода, номинальная, при $P_{кр.п}$ и при $P_{кр.макс}$, км/ч;

$\kappa_1 = P_{кр.макс}/P_{кр.п}$; $\kappa_2 = P_{кр.п}/P_{кр.н}$; $P_{кр.макс}$ – сила тяги трактора, соответствующая максимальному крутящему моменту, кН.

Величину $P_{кр.макс}, P_{кр.п}, P_{кр.н}$ находим с помощью следующего выражения при известных $M_{макс}, M_n$ и M_n [143]:

$$P_{кр.макс} = \frac{M_{макс} \cdot i_{тр} \cdot \eta_{тр} \cdot 10^{-3}}{r_k} - (m_{г} \cdot g \cdot f), \quad (2.58)$$

где $i_{тр}$ – передаточное число трансмиссии;

$\eta_{тр}$ – механический КПД трансмиссии;

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

$m_э$ – эксплуатационная масса трактора, r ;

f – коэффициент сопротивления качению;

g – ускорение силы тяжести.

Далее определяем $P_{кр.п}$, $P_{кр.н}$.

Скорость движения трактора $V_о$ на определенной передаче рассчитываем по формуле [143]

$$V_о = \frac{\pi \cdot n_о}{30} \cdot \frac{r_k}{i_{тр}} (1 - \delta), \quad (2.59)$$

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

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

Аналогично рассчитываются математические ожидания часового расхода топлива \overline{G}_T [74].

$$\begin{aligned} \overline{G}_T = & 0,5(a^* + b^* \overline{P}_{kp}) + (a_1^* + b_1^* \overline{P}_{kp})\Phi(t_n) + (a_2^* + b_2^* \overline{P}_{kp})\Phi(t_n) - \\ & - \sigma_p \{ (b_1^* \varphi(t_n) + b_2^* \varphi(t_n)) \}, \end{aligned} \quad (2.60)$$

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

$a_1^*, b_1^*, a_2^*, b_2^*, a^*, b^*$ – расчетные коэффициенты, определяемые при аппроксимации тяговой характеристики трактора по расходу топлива (см. таблицу 2.4).

Суммарные энергозатраты при использовании МТА можно определить по формуле [161]

$$E_{мта} = E_{ОПР} + E_A, \quad (2.61)$$

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 следующим соотношениям:

$$\bar{E}_{OPP} = \frac{C_E \cdot \bar{G}_T}{\bar{N}_{кр}}, \quad (2.62)$$

где \bar{E}_{OPP} – математическое ожидание прямых топливно-энергетических затрат, кДж/га;

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

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

η_T – тяговый КПД трактора на рабочем режиме;

τ – коэффициент использования времени смены;

$\bar{N}_{кр} = f(\bar{P}_{кр})$ – математическое ожидание тяговой мощности трактора, кВт.

\bar{M}_c – среднее значение момента сопротивления на коленчатом валу двигателя трактора, $н \cdot м$.

$\bar{P}_{кр}$ – среднее значение силы тяги на крюке, кН.

$\bar{G}_T = f(\bar{M}_c)$, $\bar{G}_T = f(\bar{P}_{кр})$ – математическое ожидание часового расхода топлива, кг/ч;

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 в работе [158] предлагается использовать выражение

$$E_A = \frac{\sum_{i=1}^{N_i-1} (C_{Pi} \cdot W \cdot T_{см} \cdot n_{см}) + N^1 \cdot C_{Pi} \cdot W \cdot T_{см} \cdot n_{см}}{S_0}, \quad (2.63)$$

где C_{Pi} – коэффициент потерь урожая, МДж/га·день;

$$C_{Pi} = Y \cdot \Delta y \cdot Q / 100, \quad (2.64)$$

где Y – планируемая урожайность, кг/га;

Δy – потери урожая 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 2.7) [160].

Таблица 2.7 – 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

$$N^1 = \frac{S_0}{W \cdot T_{см} \cdot n_{см}}, \quad (2.65)$$

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

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

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

Значения Δy устанавливаются с учетом условий природно-климатических зон либо могут быть приняты из таблицы 2.5.

Определение величины потерь энергии E_A с использованием выражения (2.62) необходимо осуществлять путем сравнения базового значения производительности $W_б$, которое соответствует номинальному режиму работы МТА, и оптимального значения $W_{онм}$, которое соответствует оптимальному режиму работы агрегата с учетом негативного влияния колебаний внешней погрузки.

Базовое значение производительности МТА $W_б$ и оптимальное значение $W_{онм}$ в данном случае определяются по выражениям (2.53) и (2.56).

Коэффициент, учитывающий степень влияния переменного крутящего момента на производительность МТА, определяется по формуле

$$\lambda_{\overline{W}_q} = \overline{W}_q^* / \overline{W}_{q_n}, \quad (2.66)$$

где \overline{W}_q^* – среднее значение часовой производительности, соответствующее оптимальному нагрузочному режиму двигателя, га/ч;

\overline{W}_{q_n} – среднее значение часовой производительности агрегата в области номинального режима, га/ч.

Оптимальные и базовые значения топливно-энергетических затрат g_{eopt} и $g_{eб}$ с учетом переменных внешних воздействий на агрегат определяются по выражению [1]:

$$\overline{g}_e = \overline{G}_T / \overline{N}_e, \quad (2.67)$$

где \overline{g}_e – среднее значение удельного расхода топлива, г/кВт·ч;

\overline{G}_T – средний часовой расход топлива, кг/ч;

\overline{N}_e – среднее значение мощности дизеля, кВт.

Коэффициент, учитывающий степень влияния переменного крутящего момента на удельный расход топлива g_e , определяется по формуле

$$\lambda^* \overline{g}_e = \overline{g}_e^* / \overline{g}_{en}, \quad (2.68)$$

где \overline{g}_e^* – среднее значение удельного расхода топлива, соответствующее оптимальному нагрузочному режиму двигателя, г/кВт·ч;

\overline{g}_{en} – среднее значение удельного расхода топлива в области номинального режима, г/кВт·ч.

Обобщающий критерий оценки влияния оптимальных параметров и режимов работы МТА на энергозатраты технологического процесса E_{MTA} определяется по соотношению [161]:

$$\lambda^* \overline{E}_{MTA} = \overline{E}_{MTA}^* / \overline{E}_{MTAб}, \quad (2.69)$$

где $\lambda^*_{\bar{E}_{MTA}}$ – 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}_{MTAb} – базовое значение энергозатрат при использовании агрегата в области номинального режима работы двигателя, МДж/га.

Общая энергопродуктивность урожая E_n определяется с помощью следующего выражения [160]:

$$E_n = E_{\text{э}} \cdot \eta_{\text{э}} + \Delta E_{ni}, \quad (2.70)$$

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

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

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

$$\Delta E_{ni} = \sum_{i=1}^n E_{ai} \cdot \eta_{ai}, \quad (2.71)$$

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

Из выражения (2.70) получаем [161]

$$\eta_{ai} = \Delta E_{ni} / \sum_{i=1}^n E_{ai}, \quad (2.72)$$

В таблице 2.8 представлены значения ΔE_{ni} для одной из природно-климатических зон Красноярского края [160].

Таблица 2.8 – Чувствительность энергопродуктивности ΔE_{ni} яровой пшеницы к энерготехнологическим воздействиям E_{ai} в Восточной Сибири при средней урожайности 32 ц/га

Вид энергетического воздействия E_{ai}	Прибавка, %	Прибавка, ц/га	Энергосодержащие прибавки, МДж/га	Энергозатраты, МДж/га	Чувствительность энергосопрежения
Обработка почвы под пар с внесением удобрений	20	6,40	8192	6067	1,36
Посев с внесением минеральных удобрений	6	2,88	3686	2514	1,46
Зяблевая вспашка	5	1,60	2048	1557-вспашки	1,32
Подготовка семян к посеву	3,5	1,12	1434	263	5,46
Лущение	4	1,28	1638	554	2,96
Предпосевная культивация	4	1,28	1638	246	6,66
Химпрополка	4	1,28	1638	255	6,42
Обработка ядами	4	1,28	1638	255	6,42
Закрытие влаги	3	0,96	1228	199	6,18
Боронование всходов	2	0,64	820	199	4,12

Энергозатраты антропогенных воздействий E_{ai} формируются прежде всего из затрат на семена и удобрения, горюче-смазочные материалы, а также из энергии, затраченной при использовании техники.

Поэтому коэффициент η_{ai} с учетом эффективности использования оптимальных режимов работы МТА можно рассчитать по формуле [161]

$$\eta_{ai} = \Delta E_{ni} / (\sum_{i=1}^n E_{ai} \cdot \lambda_{E_{MTA}}^*) . \quad (2.73)$$

3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ МТА

3.1. Оценка влияния оптимальных параметров и режимов работы МТА на уровень энергозатрат технологического процесса

В первой главе было установлено, что энергозатраты при работе агрегатов на режиме рабочего хода в процессе выполнения различных технологических операций в составе машинных комплексов по возделыванию сельскохозяйственных культур определяются двумя основными составляющими [161]:

основные прямые топливно-энергетические затраты;

энергозатраты, обусловленные несоблюдением оптимальных параметров и режимов работы агрегатов.

$$E_{mta} = E_{OIP} + E_A, \quad (3.1)$$

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

E_{OIP} – 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 [14]:

$$\bar{E}_{onp} = \frac{C_E \cdot \bar{G}_T}{\bar{N}_e}, \quad (3.2)$$

где \bar{E}_{onp} – математическое ожидание основных прямых топливно-энергетических энергозатрат;

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

\bar{N}_e – математическое ожидание эффективной мощности дизеля, кВт;

\bar{G}_T – средний часовой расход топлива, кг/ч.

Снижение или увеличение энергозатрат при работе агрегатов на режиме рабочего хода по первой составляющей в значительной степени зависит от оптимальной величины вероятностных коэффициентов λ_{N_e} , $\lambda_{N_{кр}}$ и λ_{G_T} , определяемых по выражениям:

$$\lambda_{N_e} = \frac{\overline{N_e}}{\overline{N_{ен}}} , \quad (3.3)$$

где $\overline{N_e}$ – среднее значение мощности двигателя в области оптимального режима;

$\overline{N_{ен}}$ – среднее значение мощности двигателя в области номинального режима, кВт.

$$\lambda_{G_T} = \frac{\overline{G_T}}{\overline{G_{ТН}}} , \quad (3.4)$$

где $\overline{G_T}$ – среднее значение часового расхода топлива в области оптимального режима, кг/ч;

$\overline{G_{ТН}}$ – среднее значение часового расхода топлива в области номинального режима, кг/ч.

$$\lambda_{N_{кр}} = \frac{\overline{N_{кр}}}{\overline{N_{кр.н}}} , \quad (3.5)$$

где $\overline{N_{кр}}$ – среднее значение тяговой мощности трактора в области оптимального режима, кВт;

$\overline{N_{кр.н}}$ – среднее значение тяговой мощности трактора в области номинального режима, кВт.

Исходя из выражений (3.3)–(3.5), при оптимальных значениях коэффициентов λ_{N_e} , $\lambda_{N_{кр}}$ и λ_{G_T} можно получить оптимальное значение математического ожидания удельного расхода топлива $\overline{g_e}$ и, следовательно, минимальные потери энергии через топливо при воздействии на МТА переменных внешних факторов.

Вторая составляющая энергозатрат зависит от потерь урожая сельскохозяйственных культур при нарушении агросроков выполнения полевых работ. В данном случае нарушение агросроков происходит по причине снижения производительности под воздействием переменной нагрузки. Энергия E_a , потерянная при нарушении агросро-

ков выполнения технологических операций, может быть найдена по формуле

$$E_A = \frac{\sum_{i=1}^{N_i-1} (C_{\Pi i} \cdot \overline{W}_q \cdot T_{см} \cdot n_{см}) + N^1 \cdot C_{\Pi i} \cdot \overline{W}_q \cdot T_{см} \cdot n_{см}}{S_0}, \quad (3.6)$$

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

$$C_{\Pi} = Y \cdot \Delta y \cdot Q / 100,$$

где Y – планируемая урожайность, кг/га;

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

N_i – число целых дней в N^1 ;

S_0 – объем работы на данной операции, га,

\overline{W}_q – среднее значение производительности агрегата, га/ч;

Q – энергоемкость одного килограмма продукта, МДж/кг.

$$N^1 = \frac{S_0}{\overline{W}_q \cdot T_{см} \cdot n_{см}}, \quad (3.7)$$

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

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

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

Средние значения производительности агрегата рассчитываются по формулам (2.53) и (2.56). Из этих выражений видно, что производительность агрегата зависит от различных факторов, но прежде всего от значения эффективной мощности дизеля и тяговой мощности трактора.

Коэффициент, учитывающий степень влияния переменных факторов на производительность МТА, определяется по формуле

$$\lambda_{\overline{W}_q} = \overline{W}_q / \overline{W}_{q_n}, \quad (3.8)$$

где \overline{W}_q – среднее значение часовой производительности, соответствующее оптимальному нагрузочному режиму двигателя, га/ч;

$\overline{W}_{чн}$ – среднее значение часовой производительности агрегата в области номинального режима.

Оптимальное и базовое значения топливно-энергетических затрат $g_{опт}$ и $g_{об}$ с учетом переменных внешних воздействий на агрегат определяются по выражению [1]

$$\overline{g}_e = \overline{G}_T / \overline{N}_e, \quad (3.9)$$

где \overline{g}_e – среднее значение удельного расхода топлива, г/кВт·ч;

\overline{G}_T – средний часовой расход топлива, кг/ч;

\overline{N}_e – среднее значение мощности дизеля, кВт.

Коэффициент, учитывающий степень влияния переменного крутящего момента на удельный расход топлива g_e , определяется по формуле

$$\lambda_{\overline{g}_e}^* = \overline{g}_e^* / \overline{g}_{ен}, \quad (3.10)$$

где $\lambda_{\overline{g}_e}^*$ – оптимальное значение коэффициента изменения удельного расхода топлива;

\overline{g}_e^* – среднее значение удельного расхода топлива, соответствующее оптимальному нагрузочному режиму двигателя, г/кВт·ч;

$\overline{g}_{ен}$ – среднее или базовое значение удельного расхода топлива в области номинального режима, г/кВт·ч.

Обобщающий критерий оценки влияния оптимальных параметров и режимов работы МТА на энергозатраты технологического процесса $E_{МТА}$ определяется по соотношению [161]:

$$\lambda_{\overline{E}_{МТА}}^* = \overline{E}_{МТА}^* / \overline{E}_{МТАб}, \quad (3.11)$$

где $\lambda_{\overline{E}_{МТА}}^*$ – оптимальное значение коэффициента оценки величины энергозатрат при использовании МТА;

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

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

Общая энергопродуктивность урожая E_n определяется с помощью следующего выражения [160]:

$$E_n = E_{\vartheta} \cdot \eta_{\vartheta} + \Delta E_{ni}, \quad (3.12)$$

где E_{ϑ} – экологическая энергия, МДж;

η_{ϑ} – биоэнергетический КПД растений;

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

$$\Delta E_{ni} = \sum_{i=1}^n E_{ai} \cdot \eta_{ai}, \quad (3.13)$$

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

Из выражения (3.13) получаем [160]:

$$\eta_{ai} = \Delta E_{ni} / \sum_{i=1}^n E_{ai}. \quad (3.14)$$

Значения ΔE_{ni} для одной из природно-климатических зон Красноярского края представлены в таблице 7 [155].

Энергозатраты антропогенных воздействий E_{ai} формируются прежде всего из затрат на семена и удобрения, на горюче-смазочные материалы, а также из энергии, затраченной при использовании техники. Поэтому коэффициент η_{ai} с учетом эффективности использования оптимальных режимов работы МТА можно рассчитать по формуле [161]

$$\eta_{ai} = \Delta E_{ni} / \left(\sum_{i=1}^n E_{ai} \cdot \lambda_{\bar{E}_{MTA}}^* \right). \quad (3.15)$$

В процессе решения проблемы оптимизации функционирования таких сложных систем, как машинно-тракторный агрегат, обычно

возникают определенные сложности установления функциональной зависимости выходных параметров от входных.

Применение классических аналитических методов для решения данной задачи зачастую не позволяет наиболее полно и глубоко изучить характер поведения системы. Это обстоятельство 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 целевых функций, описывающих зависимость между входными и выходными характеристиками системы. Таким образом, встает вопрос о применении менее требовательных и в то же время более эффективных методов оптимизации. В качестве подобных методов могут быть использованы так называемые эволюционные методы, или генетические алгоритмы, использующие моделирование процессов на основе природной эволюции [78, 82].

Применение ГА позволяет с высокой эффективностью оптимизировать многопараметрические, многоэкстремальные функции. Оптимизация функционирования сложных систем – это, прежде всего, поиск оптимума, зависящего от ряда входных параметров или от значения определенного параметра, при котором достигается наиболее приемлемый результат оптимизации. Преимущество ГА перед традиционными классическими методами заключается в его способности манипулировать многими параметрами одновременно, находя при этом наиболее приемлемое решение задачи [82].

При выборе метода оптимизации необходимо учитывать следующие недостатки классического метода (нахождение оптимума путем исследования на экстремум целевой функции):

1. Критерии, используемые для оценки эффективности работы МТА, обладают определенной противоречивостью, так как в реальных условиях на мощность двигателя и производительность агрегата, а также на расход топлива могут влиять различные факторы, нарушающие согласованность действия критериев оптимизации. Эти факторы могут быть переменными величинами в вероятностно-стохастическом смысле.

2. Согласно первому пункту, вариантов нахождения оптимального значения указанных показателей достаточно и каждому варианту соответствуют значения оптимизируемых целевых функций. Это приводит к тому, что перебор всех возможных вариантов решения за-

дачи затруднен или невозможен.

3. Исходя из первого и второго пунктов, можно утверждать, что классические методы неэффективны, поэтому 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 [78, 82], так как для них такая задача не составляет дополнительных трудностей в отличие от классических методов оптимизации.

Основными преимуществами генетических алгоритмов являются следующие:

а) 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;

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

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

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

д) генетические алгоритмы также очень эффективны в случаях, когда:

неизвестен способ нахождения точного решения задачи;

способ нахождения точного решения известен, 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: однокритериальная оптимизация и многокритериальная оптимизация.

Если рассматривать поставленную задачу как однокритериальную (принимая за критерий либо максимум эффективной мощности двигателя или трактора и производительность агрегата, либо минимум расхода топлива), то оптимальным решением задачи будет такое, при котором целевая функция принимает максимальное (минимальное) значение.

Используя соответствующие механизмы работы ГА, можно путем подбора определенных характеристик и параметров двигателя и трактора максимально снизить негативное влияние случайных вход-

ных факторов на такую сложную систему, как машинно-тракторный агрегат.

В качестве переменных могут быть использованы частота вращения дизеля и крутящий момент на коленчатом валу двигателя, коэффициент приспособляемости, сила тяги на крюке, часовой расход топлива, а также коэффициенты вариации входных воздействий на агрегат. Варьируя вышеназванными переменными оптимизации с использованием методики ГА, мы имеем возможность подбора такой регуляторной характеристики двигателя и тяговой характеристики трактора, при наличии которых их деформация под воздействием переменных внешних факторов будет минимальной.

При этом необходимо учитывать параметры и характеристики дизеля, трактора и устройств, отвечающих за их поведение в реальных координатах.

3.2. Формализация задачи определения оптимальных параметров и режимов работы МТА

В предыдущей главе рассмотрены аналитические модели, позволяющие осуществлять оценку основных показателей эффективности функционирования агрегатов.

Данные модели предоставляют возможности для широкого выбора таких показателей. Кроме того, представленная методика оценки функционирования агрегатов позволяет определить вероятность пребывания системы в различных состояниях, что дает возможность получать комплексные оценки эффективности. Имеющийся комплекс моделей позволяет перейти к формализации задачи выбора оптимальных параметров и режимов работы МТА. Выполним эту формализацию [84].

Очевидно, что формализация задач определения оптимальных параметров и режимов работы агрегата должна привести к оптимизационным постановкам.

При этом используются две группы критериев:

1. Критерии, связанные с оптимизацией энергетических параметров двигателя трактора, входящего в состав МТА, а именно: критерий мощности, который должен быть максимизирован;

критерий часового расхода топлива, который условно должен быть минимизирован;

критерий удельного расхода топлива (данный критерий является альтернативным, так как зависит и от мощности и от часового расхода топлива), который должен быть минимизирован.

2. Критерии оптимизации параметров и режимов работы трактора (параметры тяговой характеристики):

максимум тяговой мощности трактора;

минимум часового расхода топлива на данной передаче;

минимум удельного тягового расхода на данной передаче (этот критерий является альтернативным по отношению к тяговой мощности трактора и часового расхода топлива).

Становится очевидным, что речь идет о многокритериальной задаче оптимизации. Поэтому необходимо выполнить анализ степени противоречивости критериев.

Недостатки метода ведущего критерия, свойственные многокритериальным задачам, в данном случае не существенны, так как критерии согласованы. Совсем отказаться от других критериев все же нельзя, так как возможны случаи, когда при значительном улучшении ведущего критерия остальные могут принять недопустимые значения.

Таким образом, проблема выбора оптимальных параметров и режимов работы МТА формализуется в виде многокритериальной задачи оптимизации с двумя группами критериев.

При выделении ведущего критерия или ведущих в каждой группе получаем задачу с двумя группами критериев и группами ограничений, в которые превратятся остальные критерии.

Существенную проблему для решения полученной задачи оптимизации создает способ вычисления целевых функций (критериев). Как уже отмечалось, в предыдущих главах были представлены аналитические модели. Исходя из сложности данного класса моделей, можно утверждать, что применение методов математического анализа для исследования этих моделей с целью решения глобальных оптимальных алгоритмов затруднено и имеет низкую эффективность. Целевые функции представленных выше задач оптимизации можно считать заданными алгоритмически, поэтому для их решения могут быть использованы высокоэффективные методы прямого поиска, ко-

которые могут работать со многими критериями и переменными, входящими в целевые функции задач оптимизации.

В качестве конечной цели решения оптимизационной задачи рассматриваются параметры стендовой характеристики двигателя и тяговой характеристики трактора, которые определяются и оцениваются с помощью комплексного критерия – минимум энергозатрат технологического процесса. Данный комплексный критерий определяется в свою очередь оптимальными значениями критериев первой и второй группы, представленных выше.

При решении поставленной оптимизационной (для примера используется первая группа критериев) в целевых функциях необходимо использовать следующие переменные, имеющие свои ограничения в области определения их значений:

K – коэффициент приспособляемости, или коэффициент запаса крутящего момента;

n_x, n_H, n_P, n_{min} – частота вращения вала двигателя соответственно: холостого хода, при номинальном моменте, при предельном моменте и при максимальном моменте, мин^{-1} ;

ν_M – коэффициент вариации крутящего момента на валу двигателя;

\overline{M}_K – среднее значение крутящего момента (для каждого тягового класса или категории тракторов \overline{M}_K имеет свои значения), Н·м;

σ_M – стандарт крутящего момента M_K , Н·м;

G_{TH}, G_{TN}, G_{TO} – часовой расход топлива соответственно: холостого хода, номинальный, при максимальном крутящем моменте, кг/ч;

$N_{e\max}$ – мощность двигателя, соответствующая M_{\max} для различных двигателей тракторов, кВт;

Таким образом, многокритериальную оптимизационную модель можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} N_{e\max}(x_1 \dots x_i) &\rightarrow \max; \\ G_{T\min}(x_1 \dots x_j) &\rightarrow \min; \\ g_{e\min}(x_{i1}, x_{j1} \dots x_i, x_j) &\rightarrow \min. \end{aligned}$$

При наличии ограничений

$$\begin{aligned} N_{ek} &\geq N_{ek}^o; \\ G_{Tk} &\leq G_{Tk}^o; \\ g_{ek} &\leq g_{ek}^o, \end{aligned} \quad (3.16)$$

где N_e – критерий максимума мощности;

G_T – критерий минимума часового расхода топлива;

g_e – критерий минимума удельного расхода топлива;

N_{ek} – ограничения для критерия по мощности;

G_{Tk} – ограничения для критерия по часовому расходу топлива;

g_{ek} – ограничения для критерия по удельному расходу топлива;

$N_{ek}^o, G_{Tk}^o, g_{ek}^o$ – допустимые уровни ограничений;

x_i, x_j – переменные, входящие в целевые функции.

Аналогично выглядит оптимизационная модель с использованием критериев второй группы (здесь учитываются параметры тяговой характеристики трактора).

В качестве допустимых уровней ограничений для представленных критериев рассматриваются области определений переменных x_i, x_j .

Необходимо отметить, что составляющими представленной многокритериальной модели оптимизации являются однокритериальные составляющие задачи оптимизации, позволяющие получить решение по одному наиболее весомому критерию. Полученная формальная модель задачи повышения эффективности работы МТА представляет собой задачу многокритериальной оптимизации с несколькими переменными и алгоритмически заданными целевыми функциями с расчетом по аналитической формуле. Критерии оптимизации имеют свои ограничения в области значений.

3.3. Использование эволюционных алгоритмов или адаптивных поисковых методов при решении сложных задач оптимизации

К числу адаптивных поисковых методов оптимизации сложных систем относятся эволюционные алгоритмы (ЭА), которые позволяют с высокой эффективностью решать оптимизационные задачи. На се-

годняшний день все большее распространение получают генетические алгоритмы, входящие в семейство ЭА.

Генетические алгоритмы доказали свою конкурентоспособность при решении многих практических задач, где математические модели имеют сложную структуру и применение классических методов малоэффективно или невозможно.

Некоторые сведения из теории ГА рассматривались в первой главе. Поэтому, для обоснования выбора механизма ГА в оптимизационной модели можно отметить следующие положения.

ЭА базируются на коллективном обучающем процессе внутри популяции (множества решений задачи) индивидуумов (под индивидуумом понимается полученное значение целевой функции в той или иной точке области определения переменных), каждый из которых представляет собой поисковую точку в пространстве допустимых решений задачи. Популяция случайно инициализируется и затем охватывает лучшие регионы поискового пространства посредством таких операторов ГА, как селекция, мутация и рекомбинация или скрещивание. Окружающая среда представляет качественную информацию (значение критерия) или степень пригодности (соответствие критерию) поисковых точек (индивидуумов), а процесс селекции отбирает тех индивидуумов, у которых значение пригодности выше.

Отобранные потомки являются в свою очередь родителями в следующем поколении решений задачи. Механизм рекомбинации перемешивает генетическую информацию родителей (для рождения одного или нескольких потомков – решений), а механизм мутации способствует обновлению генетической информации потомков.

Генетические алгоритмы являются наиболее используемыми из класса ЭА, имеющих достаточно большое распространение во всем мире [147]. Основные принципы ГА были сформулированы Голландом [177] в 1975 году и хорошо описаны в ряде научных работ на эту тему [36, 98, 135, 144–147, 154, 172–180]. Общая схема стандартного генетического алгоритма имеет следующую структуру (рисунок 3.1).

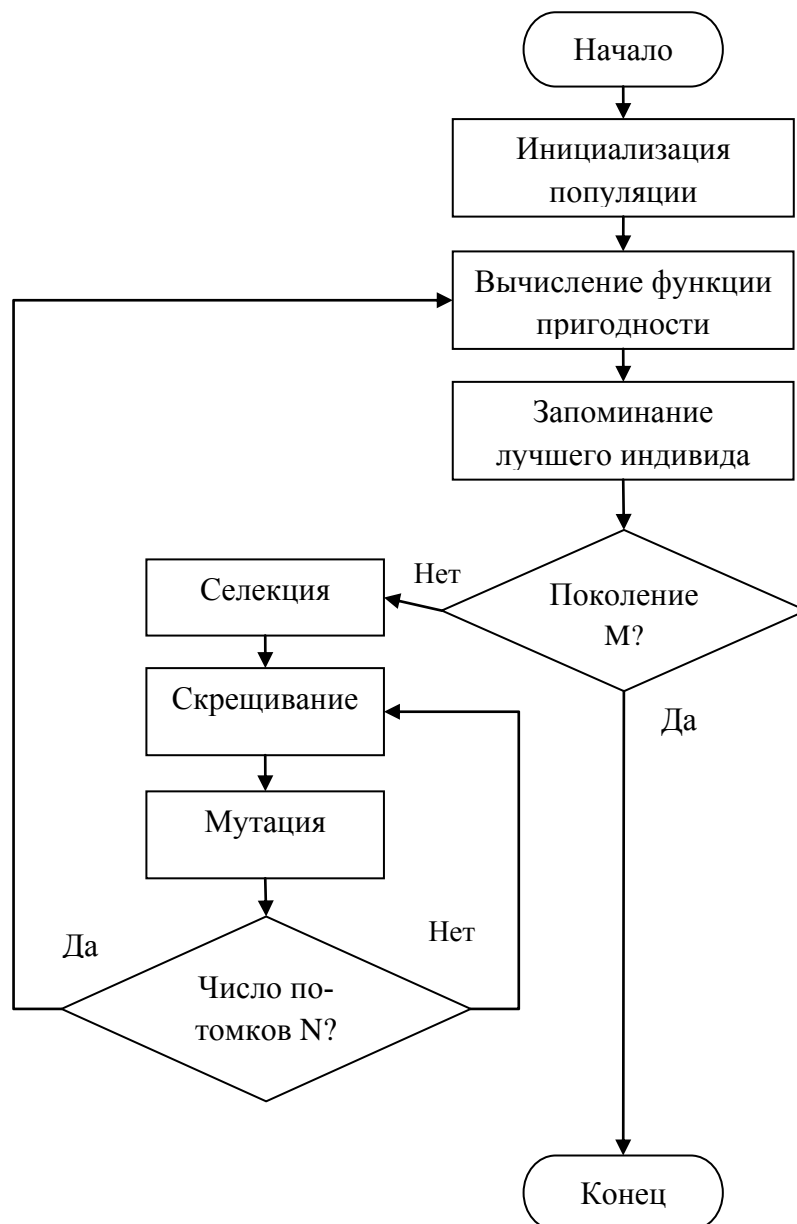


Рисунок 3.1 – Схема стандартного генетического алгоритма

Для построения эволюционного алгоритма необходимо выполнить следующие шаги:

- выбрать представление решений в виде хромосом или генотипов (как правило, бинарной строки символов из 0 и 1);

- выбрать способ инициализации популяции, состоящей из n -го количества индивидов;

- выбрать основной или основные операторы ГА (мутация, скрещивание, селекция);

- выбрать способ оценки пригодности решения задачи (индивида) или способ оценки качества решения в соответствии с необходимым значением критерия оптимальности;

выбрать способ управления популяцией, т.е. способ выбора решений задачи в соответствии с их пригодностью для дальнейшего процесса получения потомков (вновь инициализированной популяции);

выбрать способ остановки алгоритма при условии наилучшей пригодности полученных решений.

Обычно используется следующее представление решений в ГА.

Решения в ГА представляются в виде «хромосом» или в виде бинарной строки, т.е. вектора-столбца \bar{x} определенной длины, компоненты которого могут принимать значения из множества $\{0;1\}$.

Необходимо отметить, что стандартный генетический алгоритм может решать задачи оптимизации и на вещественных векторах. При решении задачи на вещественных строках (с использованием вектор-столбца \bar{x} конечной длины n , компоненты которого могут принимать значения из множества $\{Left_i; Right_i\}$) происходит преобразование исходной задачи к задаче оптимизации на бинарных строках.

Необходимо ввести некоторые определения, характеризующие ЭА (разновидностью которых являются ГА) [147]. Понятие целевой функции f равнозначно понятию функционала $f(\bar{x})$, \bar{x} – это

$$\bar{x} = (x_1; \dots x_i; \dots; x_n), \bar{x} \in X, \quad (3.17)$$

где X – поисковое пространство.

Итак, $f: R^n \rightarrow R^1$ – целевая функция, которая должна быть оптимизирована. Функция пригодности определяется степенью соответствия (пригодность) решений целевой функции установленной критерием оптимизации области J . Функция пригодности $\Phi: X \rightarrow R$ (где X – пространство индивидуумов или множество решений задачи) и целевая функция f могут различаться, но f всегда является составляющей Φ . Под решением задачи понимается любой элемент $\bar{a} \in J$ (он же индивидуум).

$M(x)$ – мощность множества X , или размер «родительской популяции». $\lambda(J)$ – мощность множества J , или размер популяции «потомков». Под популяцией понимается либо множество решений $\bar{x} \in X$, т.е. исходных представлений решения задачи, либо множество значений целевой функции J на поисковом пространстве X .

Мощность множества $\mathcal{J}(J)$ создается посредством рекомбинации и мутации в каждом поколении (определенный вариант решения задачи).

Индивидуумы $\bar{a} \in J$ составляют популяцию

$P(t) = \{\bar{a}(t), \dots, \bar{a}_\mu(t)\}$. Оператор рекомбинации $R_{Q_R} : J^m \rightarrow J^l$ определяется параметрами из множества Q_R . Оператор мутации $M_{Q_m} : J^n \rightarrow J^\lambda$ модифицирует популяцию потомков (определенный вариант решения задачи оптимизации). Операторы рекомбинации и мутации могут работать как макрооператоры, которые видоизменяют целые популяции индивидуумов. При необходимости они могут использоваться как локальные операторы для создания одного решения задачи. Оператор селекции $S_{Q_s} : (J^\lambda \cup J^{\mu+\lambda}) \rightarrow J^\mu$ в ЭА используется для выбора множества или популяции родителей (решений – претендентов) при создании следующего, качественно нового поколения индивидуумов.

Ниже дано описание обобщенного результирующего алгоритма [160].

Алгоритм ЭА

$t := 0$;

инициализировать популяцию

$initialize P(0) := \{\bar{a}_1(0), \dots, \bar{a}_\mu(0) \in I_\mu$

оценить значение функции пригодности

$evaluate P(0) : \{\Phi(\bar{a}_1(0)), \dots, \Phi(\bar{a}_\mu(0))\}$;

while ($l(P(t)) \neq true$) *do*

recombine: $P'(t) := R_{Q_R}(P(t))$;

mutate: $P''(t) := M_{Q_m}(P'(t))$;

evaluate $P''(t) : \{\Phi(\bar{a}_1''(t)), \dots, \Phi(\bar{a}_\mu''(t))\}$;

select: $P(t+1) := S_{Q_s}(P''(t) \cup Q)$;

$t := t + 1$;

od

Здесь $Q \in \{0, P(t)\}$ есть множество индивидуумов, которые дополнительно принимаются во внимание в течение шага селекции.

Генетические алгоритмы, представляющие собой семейство ЭА, доказали свою эффективность и конкурентоспособность при решении

задач поиска и оптимизации во многих практических приложениях, где математические модели имеют сложную структуру.

В ГА предусматривается разграничение понятий фенотипа (решение, выраженное в терминах поставленной задачи) и генотипа (представление решения). ГА работает с генотипом или «хромосомой», представляющей собой закодированные определенным образом значения переменных, которые входят в целевые функции математической модели. Фенотип используется для определения пригодности индивидуумов, т.е. для оценки качества решения задачи, исходя из особенностей критерия или критериев оптимизации. Для работы алгоритма необходимо использовать некоторую функцию кодирования данных $e: D \rightarrow S$, где D – пространство поиска, S – пространство представления решений, а также функцию декодирования $e^{-1}: S \rightarrow D$.

Таким образом, ГА не решают задачу оптимизации $f(d) \rightarrow \text{opt} (d \in D)$, где $f: R^n \rightarrow R^1$ – целевая функция. ГА прежде всего решают задачу $\mu(s) \rightarrow \text{opt} (s \in S)$, где $\mu: S \rightarrow R^1$ – мощность пространства представления решений, $s = e(x)$, $\mu(s) = f\{e^{-1}/s\} = f(x)$.

Существует много способов кодирования решений, поэтому необходимо учитывать следующие положения:

способ кодирования должен соответствовать задаче, которая решается;

способ оценки генотипов;

выбор генетических операторов решения задачи.

Рассмотрим некоторые, наиболее часто применяемые способы представления решения (индивидуума).

Дискретное представление может использовать дискретные значения (бинарные, целые числа и т.д.). Пример двоичного представления решения задачи представлен на рисунках 3.2 и 3.3.

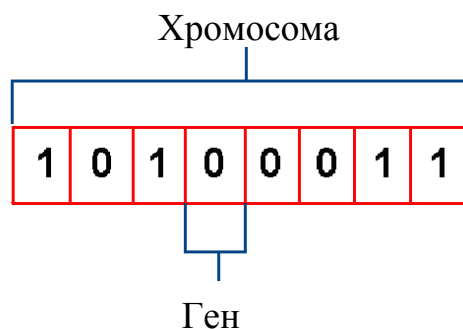


Рисунок 3.2 – Дискретное представление (двоичный алфавит)

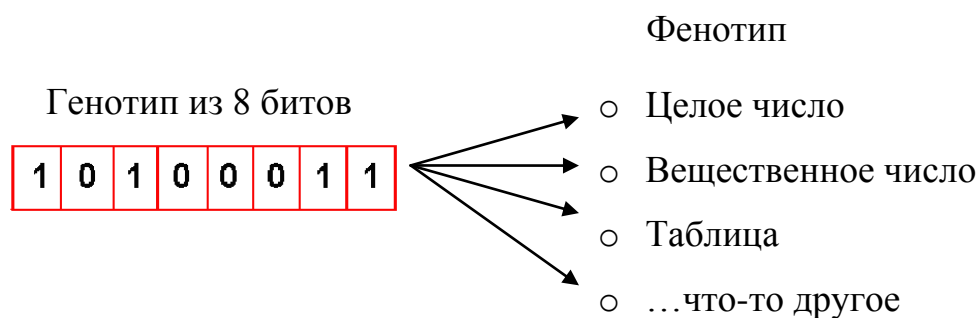


Рисунок 3.3 – Дискретное представление (двоичный алфавит)

Вещественное представление является эффективным, когда поиск производится в списке вещественных чисел. Индивидуумы представлены в качестве ряда n -вещественных чисел:

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_n], x_i \in R. \quad (3.18)$$

Порядковое представление решения рассматривается в виде перестановок индивидуумов с помощью специальных операторов. Используется представление на основе дерева. Индивидуумы в популяции – деревья. Любое S -выражение может быть представлено как дерево функций и термов. Термы – исходные данные задачи. Под функциями понимаются математические функции, методы и алгоритмы обработки исходных данных и т.д.

На практике наибольшее распространение получили ГА с бинарным представлением решений. Для примера рассмотрим метод бинаризации задачи безусловной параметрической оптимизации, когда отсутствуют ограничения на неизвестные переменные величины.

В общем виде задачу безусловной оптимизации можно представить в виде (3.19), где переменные могут быть выражены в различных шкалах измерений.

$$\begin{aligned} \chi(X) &\rightarrow \underset{X \in R \times F \times N \times P}{extr} ; \\ \chi : R \times F \times N \times P &\rightarrow R^1, \end{aligned} \quad (3.19)$$

где R – область изменения метрических переменных;

F – область изменения порядковых переменных;

N – область изменения переменных наименований;

P – область изменения переменных перестановок.

Л.А. Растрин [131] предложил метод бинаризации, который позволяет сводить задачи типа (3.19) к задачам псевдоболевой оптимизации (3.20).

$$\chi(X) \rightarrow \underset{X \in B_{2^n}}{extr},$$

$$\chi: B_{2^n} \rightarrow R^1, B_{2^n} = (X: x_j \in B_2, j = \overline{1, n}), B_2 = \{0, 1\}. \quad (3.20)$$

Суть бинарного кодирования заключается в следующем. Булев вектор n компонент может принимать 2^n значений.

К задаче (3.20) сводятся практически любые задачи с дискретными переменными, а также задачи с непрерывными переменными путем замены непрерывных переменных дискретными с заданной точностью. Методику перевода переменных в различных шкалах измерений в булевы рассмотрим на примере порядковых и метрических переменных.

Бинарным представлением порядковой переменной $f \in (a_1, \dots, a_g)$ будет вектор $X = (x_1, \dots, x_n), x_i = 0^1, i = \overline{1, n}$, где $n = \log_2 g$.

Значение булевого вектора находим путем перевода его в целое число $k = \sum_j x_j 2^{j-1}, k \in [1; g]$, тогда $f = a_k$.

Кодирование метрической переменной начинается с перевода ее в порядковую. Для этого интервал $[a, b]$ разбивается на $h = \frac{b-a}{\varepsilon}$ равных частей (ε – точность решения задачи оптимизации). Теперь переменная r измеряется в порядковой шкале $r \in \{y_1, \dots, y_{1+h}\}$, где $y_i = a + \varepsilon(i-1), i = \overline{1, 1+h}$. Далее порядковая переменная преобразуется в булеву, как показано выше.

В настоящее время кроме стандартного бинарного кодирования переменных часто используется бинарный код Грея (Graycode).

Код Грея – это бинарный код целого числа, такой, что для смежных целых чисел расстояние между их кодами в метрике Хемминга равно 1.

Стандартное рефлексивное Грей-кодирование целого числа получается применением оператора, исключающего ИЛИ к стандартному бинарному кодированию целого числа и к тому же бинарному коду, смещенному на одну позицию вправо, последний бит отсекается.

Кодирование и декодирование Грея можно выразить в виде операций с матрицами. Пусть x и u -битовое бинарное и Грей-кодирование целого числа соответственно, и G -матрица трансформации, состоящая из 1 на главной диагонали и диагонали верхнего минора и 0 в других позициях. Грей-кодирование и декодирование тогда можно представить как $x^T G$ и $y^T G^{-1}$ соответственно. Можно показать, что любая перестановка столбца в матрице G приводит к другой матрице трансформации.

На практике можно использовать следующий алгоритм перевода бинарного кода в код Грея и наоборот: начать со старшего (правого) бита для получения Грей-кода и с левого для получения бинарного кода, последовательно заменять биты по правилу:

$$(\dots, 1, 1, \dots) \rightarrow (\dots, 1, 0, \dots)$$

$$(\dots, 1, 0, \dots) \rightarrow (\dots, 1, 1, \dots)$$

$$(\dots, 0, 1, \dots) \rightarrow (\dots, 0, 1, \dots)$$

$$(\dots, 0, 0, \dots) \rightarrow (\dots, 0, 0, \dots)$$

На каждом шаге заменяется два бита и производится смещение на один бит таким образом, что на последующем шаге заменяется один новый бит и один старый.

Пример:

$X = (10011)$ – бинарное представление целого числа, Y – его Грей-код.

А) Применение исключающего ИЛИ (XOR).

$$XOR = \begin{cases} 1, \text{ if } x_1 = 1, x_2 = 0 \\ 0, \text{ if } x_1 = 0, x_2 = 1 \\ 0, \text{ if } x_1 = 1, x_2 = 1 \\ 1, \text{ if } x_1 = 0, x_2 = 0 \end{cases}$$

$$\begin{array}{r} \begin{array}{r} 10011 \\ \text{xor} \quad 01001 \\ \hline Y = (11010) \end{array} \quad \text{и обратно} \quad \begin{array}{r} 11010 \\ \text{xor} \quad 01001 \\ \hline x = (10011) \end{array} \end{array}$$

Б) Матричное кодирование.

$$G = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$Y = X^T \cdot G = (10011) \cdot \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = (11010)^T$$

$$X = Y^T \cdot G^{-1} = (11010) \cdot \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = (10011)^T$$

В) Алгоритм последовательной замены битов.

$$\begin{array}{cc} X = (100\underline{11}) & Y = (\underline{11}010) \\ \underline{10010} & \underline{10010} \\ \underline{10010} & \underline{10010} \\ \underline{10010} & \underline{10010} \\ \overline{Y = (11010)} & \text{и} \quad \overline{X = (10011)} \end{array}$$

Для многих практических задач код Грея оказывается более эффективным, чем бинарное кодирование. Код Грея частично сохраняет структуру окрестностей пространства поиска в бинаризованном пространстве. В результате Грей-код не может образовать оптимумов больше, чем у исходной целевой функции. Более того, так как у текущей точки в коде Грея соседних точек больше, чем в дискретной целевой функции, то в пространстве поиска Грей-кода число оптиму-

мов обычно меньше. В противоположность бинарный код часто создает новые оптимумы, которых у исходной целевой функции не было.

Общую схему ГА можно представить следующим образом:

1. Инициализировать случайным образом популяцию решений или случайным образом выбрать исходные значения переменных, входящих в целевую функцию.

2. С помощью оператора селекции выбрать часть популяции «родителей» для порождения «потомков».

3. Применить оператор скрещивания.

4. Полученные новые решения задачи (потомки) подвергаются мутации.

5. Формируется новая популяция или множество решений задачи из «родителей» и «потомков».

6. Операции 2–5 повторяются, пока не выполнится условие остановки алгоритма.

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):

$$P(X^i) = \frac{-fitness(X^i) + C}{r * C - \sum_{j=1}^r fitness(X^j)}, \quad (3.21)$$

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 $f(X^i) \leq f(X^j)$. Тогда

$$P(X^i) = \frac{R_i}{\sum_{k=1}^r R_k} = \frac{i}{\sum_{k=1}^r i} = \frac{2i}{r(r+1)}, \text{ где } \sum_{j=1}^r P(X^j) = 1. \quad (3.22)$$

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 сорти-

ровки 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.

Скращивание

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 $P_{crossover}$, иначе с вероятностью $(1 - P_{crossover})$ 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 3.4).

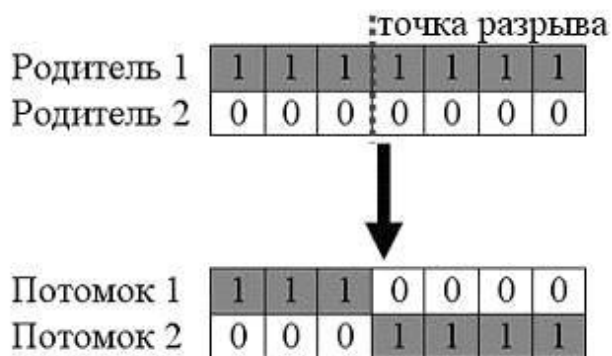


Рисунок 3.4 – Одноточечное скрещивание

При двухточечном скрещивании хромосома как бы замыкается в кольцо, выбираются две точки разрыва, родители обмениваются частями (рисунок 3.5).

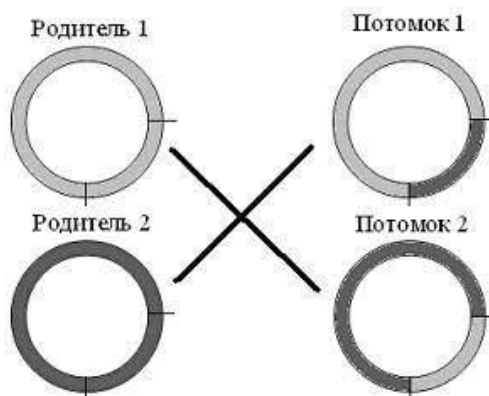


Рисунок 3.5 – Двухточечное скрещивание

При равномерном скрещивании потомок может унаследовать с равной вероятностью гены любого из родителей (рисунок 3.6).

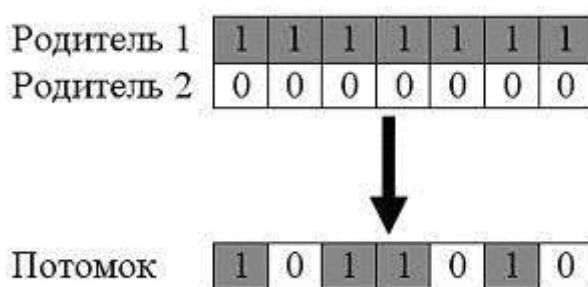


Рисунок 3.6 – Равномерное скрещивание

Равномерное скрещивание по всей популяции (uniform generoo-lrecombination) получается применением равномерного скрещивание к всем членам популяции, т.е. 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 3.7).



Рисунок 3.7 – 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 ($fitness(X^i) = \chi(X^i)$).

3.4. Анализ современных методик решения многокритериальных задач оптимизации с использованием эволюционных алгоритмов

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 характеристиками агрегатов, имеют свои области определения значений. В пределах этих областей определения или ограничения можно находить оптимумы характеристик двигателя и трактора, входящего в состав мобильного машинно-тракторного агрегата.

В настоящее время для решения задач многокритериальной оптимизации все большее распространение в исследовательской работе в самых различных областях получают эволюционные алгоритмы. Одновременная многокритериальная оптимизация нескольких многомерных и противоречащих друг другу целевых функций отличается от классической одномерной оптимизации в том, что она редко допускает единственное решение поставленной задачи.

Чаще всего проблемы многокритериальной оптимизации характеризуются многими альтернативными подходами и решениями, которые могут оцениваться равноправно. Подобное множество альтернатив характерно и в случае двух противоречивых целей, для которых целевые функции являются унимодальными и выпуклыми функциями одной переменной (одномерными).

Классические методы оптимизации (например, градиентные, симплексные и др.) неэффективны при решении задачи многокритериальной оптимизации и не могут работать с множеством решений. Поэтому при решении многокритериальных задач с помощью классических методов вышеуказанные задачи оптимизации приводятся к однокритериальным, после чего метод запускается определенное количество раз. При этом формируется некоторое семейство решений, и нахождение рационального, соответствующего установленному критерию решения задачи затрудняется или невозможно.

ЭА хорошо зарекомендовали себя как при решении однокритериальных задач, так и при решении многомерных, многокритериальных и альтернативных задач оптимизации. Это преимущество ЭА перед традиционными методами оптимизации заключено в их механизме. Многочисленные индивидуумы (решения задачи) и обширные популяции (множества решений задачи) могут вести поиск необходимого количества решений одновременно и параллельно. Методика ЭА позволяет с высокой эффективностью решать сложные задачи, имеющие такие особенности, как унимодальность, разрозненные допустимые области, наличие разнохарактерных переменных, алгоритмически заданные целевые функции. Эффективность ЭА наиболее высока при решении многокритериальных задач, которые, как правило, трудно решить традиционными или классическими методами.

На основе общего эволюционного алгоритма и его составляющих многокритериальных генетических алгоритмов разработан ряд методов решения оптимизационных задач. Наиболее распространены в настоящее время четыре разновидности ГА, а именно [59, 155]:

VEGA – Vector Evaluated Genetic Algorithm;

FFGA – Fonseca and Flemming's Multiobjective Genetic Algorithm;

NPGA – Niche Pareto Genetic Algorithm;

SPEA – Strength Pareto Evolutionary Algorithm.

Метод VEGA предложил в 1984 году Шаффер [170]. Данный метод предусматривает расширение традиционного ГА за счет использования векторных оценок степени пригодности индивидуумов и возможности параллельной оценки популяций по каждому из критериев в отдельности. Таким образом осуществляется одновременная оптимизация по всем целевым функциям.

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

Этап селекции в данном ГА протекает таким образом, что в каждом поколении создается некоторое количество подпопуляций с помощью пропорциональной селекции 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 и рекомбинации (скрещивания индивидуумов).

Механизм селекции (повторного использования хороших решений) и назначения пригодности в методе VEGA схематически выглядит следующим образом (рисунок 3.8).

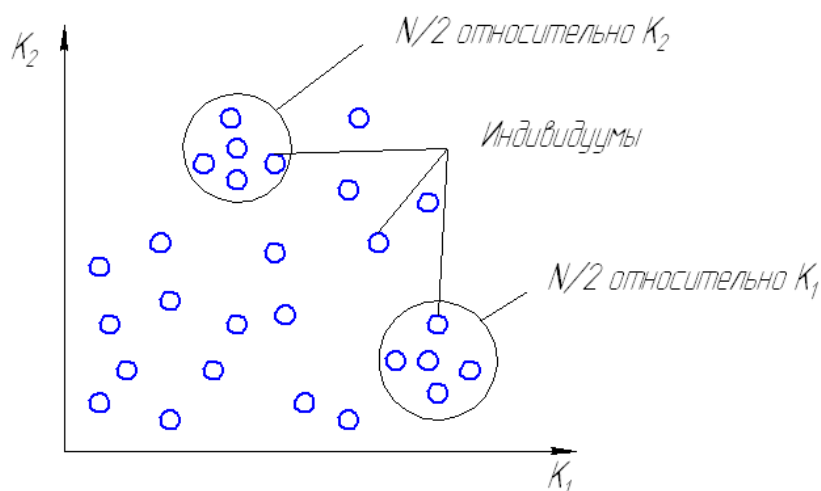


Рисунок 3.8 – Пропорциональная селекция в методе VEGA: K_1 и K_2 – критерии

На рисунке 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.

Метод FFGA предусматривает ранжирование индивидуумов, ранг каждого индивидуума определяется числом доминирующих его индивидуумов по своей пригодности. Процедура ранжирования основана на Парето-доминировании [59].

Как уже отмечалось, критерии могут быть согласованными, нейтральными и противоречивыми. Наибольший интерес представляет случай конфликтующих критериев, когда попытка улучшить один из них приводит к ухудшению других. В таком случае решение возможно только на основе компромисса. Математическая модель компромисса в оптимизации обычно строится на основе понятия множества Парето.

Решение $x \in D$ называется эффективным (паретовским, неулучшаемым), 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 .

Для задачи минимизации понятие Парето-доминирования для двух вектор-решений a и b определяется, исходя из следующих возможных вариантов:

- решение a доминирует решение b , если $f(a) \leq f(b)$;
- решение a слабо доминирует решение b , если $f(a) \leq f(b)$;
- оба решения отвечают правилу $a \approx b$.

Исходя из представленных вариантов, если $x \in D$ не доминируем ни одним $u \in D$, то x является Парето-оптимальным решением задачи.

Множество всех эффективных точек $x_p = p(D)$ называется множеством Парето, а множество $Y_p = f(x_p)$ – фронтом Парето.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод: для любой допустимой точки (решения задачи), лежащей вне множества Парето, найдется точка в множестве Парето, дающая по всем целевым функциям значения не хуже, чем в этой точке, и хотя по одной целевой функции – строго лучше. Поэтому решение многокритериальной задачи оптимизации будет более эффективным, потому что любое дру-

гое может быть улучшено определенной точкой или точками Парето как минимум по одному критерию без ухудшения других критериев и после формирования множества Парето задача может считаться решенной [59].

Метод FFGA реализует лишь схему назначения пригодности, а для отбора индивидуумов в следующее поколение используется турнирная селекция с размером турнира $T=2$, которая отбирает решения на основе их пригодности $F(i)$, $i=\overline{1, N}$. Схема FFGA представлена на рисунке 3.9.

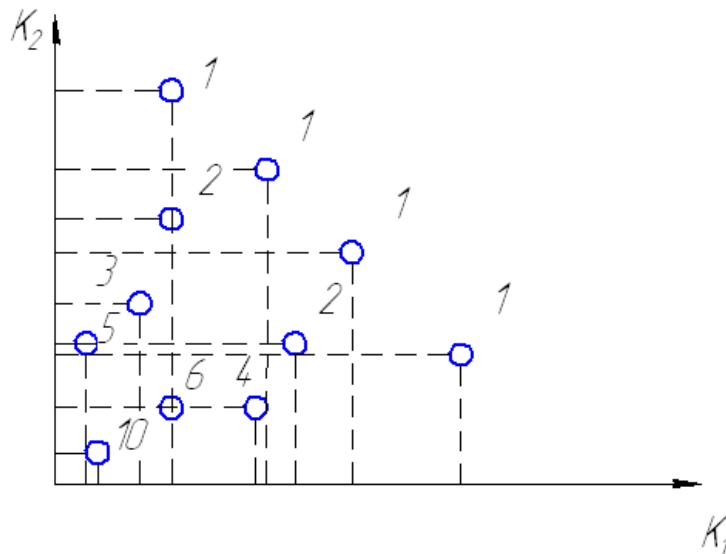


Рисунок 3.9 – Схема селекции в методе FFGA: K_1 и K_2 – критерии

Для каждого индивидуума $i \in P_t$, где P_t – популяция или множество решений, назначается его ранг $r(i)$. Причем индивидуумы, чьи решения недоминируемы относительно популяции $m(P_t)$ (m – функция извлечения вектор – решения $x = m(i)$ и декодирования бинарной строки) имеют ранг 1, а наихудший индивидуум, доминируемый всеми членами популяции, получает ранг 10.

В методе FFGA в отличие от метода VEGA пригодность назначается не по каждому критерию в отдельности, а для индивидуума по всем критериям оптимизационной задачи и определяется не значениями целевых функций, а рангом каждого индивидуума в популяции. Ранжирование основано на Парето-доминировании.

Метод NPGA отличается от двух предыдущих тем, что в нем используется комбинация турнирной селекции и доминирования по Парето с применением механизма ниширования в пространстве критериев [154]. Механизм ниширования или формирования ниш был впервые представлен в работе Голдберга и Ричардсона [154]. Цель

этого механизма – создание нишевых областей для равномерного распределения популяции вдоль всего фронта Парето.

Ниширование используется для решения многокритериальных задач с наличием полимодальности и имеющих несколько оптимальных решений. Применяемый в ГА метод образования ниш и видов для нахождения большей части оптимумов основан на так называемой функции соучастия (*sharingfunction*). Эта функция определяет уровень близости и степень соучастия каждого индивидуума (хромосомы) в популяции. Функция обозначается $S[d(i,j)]$, где $d(i,j)$ – расстояние между индивидуумами i и j .

Механизм ниширования решает задачу повышения разброса точек в поисковом пространстве. Для этого формируются подпопуляции или ниши, в которых индивидуумы более равномерно делят свою пригодность. Ниша – это группа индивидуумов, имеющих равную пригодность. В многокритериальной и многоэкстремальной оптимизации для уменьшения пригодности индивидуумов, попавших в одну и ту же нишу, используется деление общей пригодности. Это делается для увеличения разнообразия популяции или предотвращения схождения к одному решению. Таким образом можно получить устойчивые подпопуляции, соответствующие различным оптимумам функции [59].

Чем больше индивидуумов в нише находится в ближайшем соседстве к определенному индивидууму (с равной пригодностью), тем больше снижается его собственная пригодность и поддерживается разнообразие.

Соседство определяется через меру расстояния между индивидуумами i и j $d(i,j)$ и через радиус ниши σ_{share} . Расстояние $d(i,j)$ определяется по формуле [135]

$$d(i,j) = \sqrt{\sum_{k=1}^p \frac{(x_{k,i} - x_{k,j})^2}{(x_{kmax} - x_{kmin})^2}}, \quad (3.23)$$

где p – размер популяции;

x_{kmax} и x_{kmin} – максимальное и минимальное значение k -го параметра;

$x_{k,i}$ и $x_{k,j}$ – k -й параметр i -й и j -й хромосом (индивидуумов).

Общая пригодность индивидуума $i \in p$ (p – размер популяции) определяется как его старая пригодность $F'(i)$, деленная на счетчик ниши:

$$F(i) = \frac{F'(i)}{\sum_{j \in p} S[d(i, j)]}, \quad (3.24)$$

где $\sum S[d(i, j)]$ – счетчик ниши (другое значение – мощность ниши m_i).

Функция $S[d(i, j)]$ определяется по формуле

$$S[d(i, j)] = \begin{cases} 1 - \left\{ \frac{d(i, j)}{\sigma_{share}} \right\}^\alpha, & \text{если } d(i, j) < \sigma_{share} \\ 0, & \text{в противном случае} \\ & (\text{при } d(i, j) > \sigma_{share}), \end{cases} \quad (3.25)$$

где α и σ_{share} – константы, зависящие от условий задачи.

Итак, входными данными для метода NPGA являются: P_t (популяция), σ_{share} (радиус ниши, который определяется пользователем), t_{dom} (давление доминирования или количество индивидуумов в сравнительном множестве P_{dom}).

Механизм Парето-доминирования между двумя индивидуумами популяции со сравнительным множеством t_{dom} в соответствии с методом NPGA показан на рисунке 3.10. Участник турнира N_1 является победителем, так как в отличие от участника N_2 его закодированный вектор – решение не доминируется представителями сравнительного множества t_{dom} .

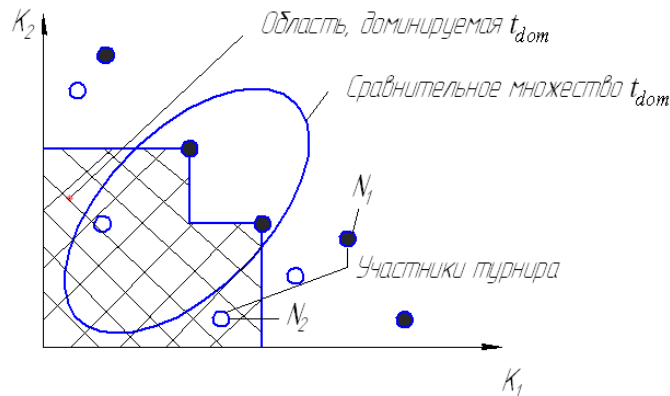


Рисунок 3.10 – Механизм отбора в методе NPGA

Необходимо отметить, что в методе NPGA назначение пригодности заменяется схемой деления пригодности или нишированием. Ниши определяются для индивидуумов в пространстве целевых функций с целью обеспечения разнообразия Парето-оптимальных решений.

Более эффективным по некоторым параметрам может быть признан метод SPEA. Он отличается от трех остальных тем, что использует Парето-доминирование для назначения степени пригодности выбранным решениям задачи, а также тем, что недоминируемые в популяции индивидуумы хранятся в специальном внешнем множестве. Кроме того, SPEA использует механизм кластеризации (разбиение выборки объектов на подмножества, называемые кластерами, или однородными группами объектов со схожими свойствами) для уменьшения количества индивидуумов, хранящихся во внешнем множестве [59].

Преимущества метода SPEA по сравнению с другими (VEGA, FFGA, NPGA) следующие:

1. Сочетание вышеназванных подходов в одном алгоритме.
2. Значение пригодности индивидуумов всей популяции оценивается с учетом пригодности индивидуумов внешнего множества, пригодность остальных не учитывается.
3. В селекции принимают участие все индивидуумы, в том числе «лучшие» из внешнего множества.
4. В методе SPEA используется механизм ниширования, в котором деление общей пригодности осуществляется на основе Парето-доминирования.

Процедура метода SPEA представлена на рисунке 3.11. Шаг №1 на рисунке не обозначен, потому что инициализация начальной популяции N или начального множества значений переменных задачи является обязательным шагом для любого эволюционного алгоритма.

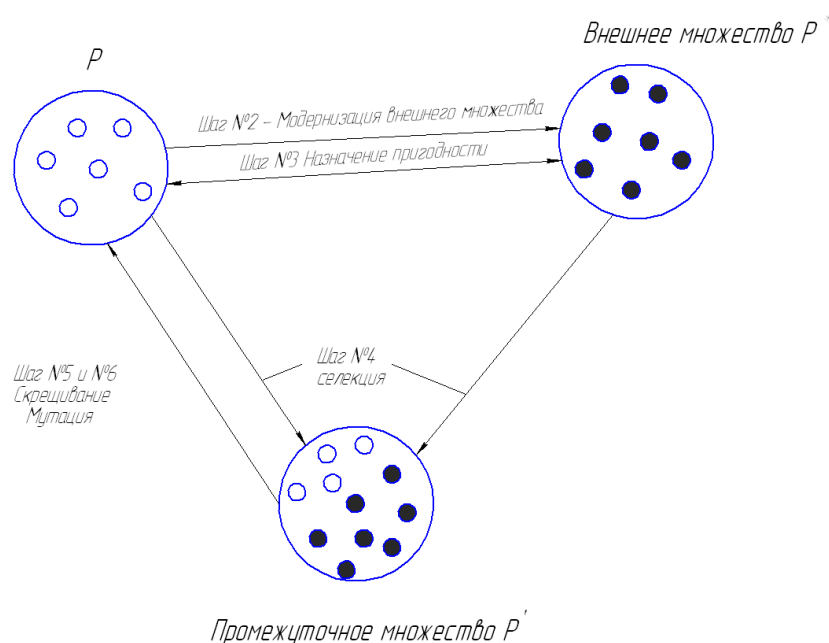


Рисунок 3.11 – Схема метода SPEA

В начале каждой итерации или шага №2 происходит модернизация внешнего множества P и его уменьшение, если его максимальный размер N был превышен. После этого индивиды $i \in P$ оцениваются относительно $i \in P^*$ для назначения пригодности (шаг №3). Шаг №4 – селекция, когда отбираются индивидуумы из объединенного множества $P + P^*$ для заполнения промежуточного множества P' . Для шага №4 применяется турнирная селекция. Окончательно проводятся скрещивание и мутация (шаги №5 и 6). Шаг №3 в представленной схеме осуществляется с использованием Парето-доминирования.

В процессе решения многих оптимизационных задач размер множества Парето может содержать очень большое, а иногда и бесконечное число решений. В этом случае нахождение всех недоминируемых или оптимальных решений является бесполезным. Кроме того на эффективность метода SPEA влияет размер внешнего множества.

В результате анализа четырех основных методов многокритериальной оптимизации с использованием ГА, а также изучения результатов проверки этих методов на тестовых задачах [59, 154] можно утверждать, что наиболее подходящими методами для решения задач многокритериальной оптимизации являются те, которые основаны на Парето-доминировании.

3.5. Методика решения задач условной оптимизации многокритериальными генетическими алгоритмами

На этапах селекции и формирования нового поколения или множества решений стандартного ГА выбор индивидуума из популяции происходит в зависимости от его степени пригодности. Степень пригодности вычисляется через функцию пригодности. Одним из недостатков классических ЭА является отсутствие механизма учета ограничений, накладываемых на переменные целевых функций. Существуют несколько методов решения этой проблемы [154].

1. Метод статических штрафов. Данный метод основан на формировании для каждого ограничения $j = (1, \dots, m)$ семейства интервалов, которые определяют соответствующие коэффициенты штрафов. В соответствии с данным методом для каждого ограничения устанавливаются уровни l его нарушения. Для каждого уровня l нарушений соответствующего ограничения определяется коэффициент штрафа

$R_{ij}(i = 1, \dots, l, j) = 1, \dots, m$. Стартовая популяция индивидуумов задается случайным образом, в ней могут присутствовать допустимые и недопустимые индивидуумы (исходя из ограничений задачи).

Пригодность индивидуумов определяется по формуле

$$fitness = f(\bar{x}) + \sum_{j=1}^m R_{ij} f_j^2(\bar{x}), \quad (3.26)$$

где m – число ограничений задачи;

$f_j(\bar{x})$ – штраф за нарушение i -го ограничения.

Недостатком метода является большое число параметров. Для m ограничений необходимо определить $m(2l + 1)$ параметров, под параметрами понимаются число интервалов для каждого ограничения из m , границы интервалов или $l+1$ уровней нарушения ограничений и коэффициенты штрафов R_{ij} для l уровней ограничения из m .

2. Метод динамических штрафов. Для общей задачи условной оптимизации вида

$$f(x) \rightarrow \text{opt } (x \in D) \quad (3.27)$$

с ограничениями в виде неравенств $g_j(x)$ и равенств $h_j(x)$

$$\begin{cases} g_j(x) \leq 0, j = \overline{1, r} \\ h_j(x) = 0, j = \overline{r+1, m} \end{cases}. \quad (3.28)$$

Пригодность индивидуума x вычисляется по формуле

$$fitness(x) = f(x) + \delta \lambda(t) \sum_{j=1}^m f_j^\beta(x), \quad (3.29)$$

где t – номер текущего поколения;

$\delta = 1$, если $f(x) \rightarrow \min$ и $\delta = -1$, если $f(x) \rightarrow \max$;

$f(x)$ – целевая функция;

$f_j(x)$ – штраф за нарушение j -го ограничения;

β – константа ($\beta = 2$);

$$\lambda(t) = (c \cdot t)^\alpha, \quad (3.30)$$

где $c = 0,5$, $\alpha = \beta = 2$.

Штрафы в данном методе вычисляются динамически, в зависимости от степени нарушения ограничений, для t текущего поколения (или t -итерации) по формуле

$$f_j(x) = \begin{cases} \max \{0, g_j(x)\}, & \text{если } 1 \leq j \leq r \\ |h_j(x)|, & \text{если } r + 1 \leq j \leq m \end{cases} \quad (3.31)$$

Метод динамических штрафов использует намного меньше параметров, чем предыдущий, так как в нем нет выбора уровней нарушения ограничений.

3. Метод «смертельных» штрафов заключается в отсеке недопустимых точек поискового пространства. Эти точки не принимают дальнейшего участия в работе алгоритма. Этот простой метод эффективен для ряда задач, при его использовании начальная популяция инициализируется с допустимыми значениями.

4. Метод адаптивных штрафов. Экспериментирование с вышеуказанными методами выявило у них ряд недостатков [154]. Например, метод «смертельных» штрафов не отличает ситуаций, когда лучшая точка допустима, от ситуации, когда лучшая точка недопустима, — это необходимо для алгоритмов прямого поиска. Для максимального исключения подобных недостатков разработана модификация метода динамических штрафов — метод адаптивных штрафов. В данном методе штрафы зависят не только от номера t итерации, но и от количества попаданий лучшего индивидуума популяции на каждой итерации в допустимую или недопустимую области.

Величина штрафов определяется по выражению

$$\lambda(t+1, \beta) = \begin{cases} \frac{\lambda(t)}{\beta_1}, & \text{если } \vec{b}^i \in D \text{ при } t-k+1 \leq i \leq t \\ \beta_2 \lambda(t), & \text{если } \vec{b}^i \in S-D \text{ при } t-k+1 \leq i \leq t \\ \lambda(t) & \text{в другом случае,} \end{cases} \quad (3.32)$$

где \vec{b}^i — лучший индивидуум i -й популяции;

$\beta_1, \beta_2 > 1$ и $\beta_1 \neq \beta_2$.

В этом методе величина штрафа на шаге $t+1$ уменьшается, если индивидуум \vec{b}^i (исходя из его пригодности) на протяжении k итера-

ций принадлежал допустимой области D , если же индивидуум \vec{b}^i выходит из допустимой области, – величина штрафа увеличивается. Таким образом штрафуются или исключаются недопустимые индивидуумы.

Установлено, что метод адаптивных штрафов имеет существенное превосходство над другими методами штрафных функций, и это превосходство возрастает с ростом сложности решаемой задачи.

Еще одной существенной проблемой при решении условной многокритериальной задачи с помощью ГА является то, что итоговые точки или искомые оптимальные решения задачи должны не только попасть в множество Парето, как решение условной задачи, но и удовлетворять всем ограничениям, т.е. лежать в допустимой области. ЭА испытывают значительные трудности при необходимости учета ограничений на значение переменных целевой функции, решая задачу оптимизации с несколькими критериями. Поэтому при выборе наиболее эффективного метода решения конкретной задачи условной оптимизации с использованием ГА необходимо учитывать вышеназванные особенности.

В результате анализа основных подходов в использовании ГА для решения задач многокритериальной оптимизации, а также изучения результатов исследований по эффективности различных модификаций ГА [59, 154 и др.] можно сделать вывод, что наиболее подходящими методами нахождения оптимальных параметров и режимов работы МТА (двухкритериальная задача с группой ограничений на значения переменных) являются ГА, основанные на концепции Парето-доминирования.

3.6. Методика оптимизации параметров и режимов работы машинно-тракторных агрегатов с использованием генетических алгоритмов

В процессе решения определенных технических задач функционирования сложных систем обычно возникает проблема установления функциональной зависимости выходных параметров системы от входных воздействий. Задача описания данной зависимости с помощью классических аналитических методов также сложна. Все это значительно затрудняет и ставит под сомнение применение классических методов оптимизации работы сложных технических систем, так

как большинство из них основываются на использовании противоречивой информации о характере поведения целевой функции. Таким образом, встает вопрос о применении более адекватных или менее требовательных методов оптимизации и в то же время более эффективных. В качестве подобных методов могут быть использованы так называемые эволюционные методы или генетические алгоритмы, в рамках которых применяется моделирование процессов на основе природной эволюции [78, 83].

ГА наиболее эффективны при оптимизации многопараметрических, многоэкстремальных функций. Оптимизация функционирования сложных механических систем – это, прежде всего, поиск оптимума, зависящего от ряда входных параметров или от значения определенного параметра, при котором достигается наиболее приемлемый результат оптимизации. Преимущество ГА заключается в его способности манипулировать многими параметрами или переменными одновременно, находя при этом наиболее рациональное решение задачи.

Рассмотрим общую задачу условной оптимизации

$$\max (\min) f(x), \quad x = (x_1, x_2, \dots, x_N) \text{ и } x_i \in [a, b] \quad i = \{1, 2, \dots, N\}, \quad (3.33)$$

где $f(x)$ – максимизируемая (минимизируемая) целевая функция, имеющая один глобальный экстремум либо ограниченное число экстремумов.

Предполагается, что о функции $f(x)$ известно то, что на переменные x налагаются ограничения в виде некоторой области определения. Прочая дополнительная информация о характере функции и ее свойствах (дифференцируемость, непрерывность, свойства Липшица и т.д.) предполагается неизвестной и не учитывается в процессе поиска.

Под решением задачи (3.33) будем понимать вектор $x = (x_1, x_2, \dots, x_N)$. Оптимальным решением задачи (3.33) будем считать вектор x^* , при котором целевая функция $f(x)$ принимает максимальное (минимальное) значение [145–147].

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

туациях, когда применение стандартных методов оптимизации крайне затруднено.

Данную методику можно применить к задаче определения оптимальных значений параметров работы МТА с целью минимизации энергозатрат. Под целевыми функциями здесь рассматриваются зависимости для расчета средних значений важнейших энергетических показателей двигателя и трактора, входящего в состав мобильного МТА, который выполняет технологические операции по возделыванию сельскохозяйственных культур [65, 67, 82]. Использование ГА позволяет найти «наилучшие» значения переменных оптимизационной задачи, использование которых дает возможность установления оптимальных характеристик двигателя, трактора и МТА в целом.

Средние значения мощности дизельного двигателя трактора с учетом переменных внешних воздействий на МТА находим с помощью выражения [25, 31]

$$\bar{N}_e = c \left[0,5(a^* \bar{M}_K + b^* \bar{M}_K^2 + b^* \sigma_M^2) - (a_1^* M_K + b_1^* \bar{M}_K^2 + b_1^* \sigma_M^2) \Phi(t_H) + b_1^* \varphi(t_H) \bar{M}_K \sigma_M \right], \quad (3.34)$$

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

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

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

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

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

$\varphi(t_H) = (2\pi)^{-1/2} e^{-0,5t_H^2}$ – плотность распределения аргумента t_H ;
 $t_H = (M_H - \bar{M}_K / \sigma_M)$;

σ_M – среднее квадратическое отклонение крутящего момента на валу двигателя.

Далее, подставляя в формулу (3.34) различные значения всех названных переменных, находим \bar{N}_e , учитывая при этом то, что M_{max}

меняется в пределах $M_{\max} = M_H \times (1,15-1,20)$ последовательно, т. е. начинаем расчет от 1,15 с последующим возрастанием до 1,2.

Для получения σ_M используем формулу

$$\sigma_M = \nu_M \bar{M}_K, \quad (3.35)$$

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

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

Средние значения часового расхода топлива для дизельного двигателя рассчитываем по формуле [25, 31]

$$\bar{G}_T = 0,5(a + b\bar{M}_K) - (a_1 + b_1\bar{M}_K)\Phi(t_H) + b_1\varphi(t_H)\sigma_M, \quad (3.36)$$

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

$A_1 = G_{TX}$; $A_2 = G_{TH} + [(G_{TH} - G_{TO})/(K - 1)]$; $B_1 = (G_{TH} - G_{TX})/M_H$; $B_2 = -(G_{TH} - G_{TO})/[M_H(K - 1)]$; здесь G_{TX} , G_{TH} , M_H , M_{\max} – переменные, подлежащие вводу в установленных границах.

$$G_{TO} = \frac{1,1G_{TH} \cdot K}{K_{об}}, \quad (3.37)$$

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

K – коэффициент приспособляемости;

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

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

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

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

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

Подставляя в формулу (3.36) различные значения всех названных переменных, находим \bar{G}_T .

Математическое ожидание часовой производительности МТА определяем следующим образом [31]:

$$M(W_q) = C_{w1} [M(N_e)] , \quad (3.38)$$

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

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

η_T – тяговый КПД трактора;

K_a – удельное сопротивление агрегата, кН/м;

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

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

Математическое ожидание эффективной мощности $M(N_e)$ для двигателя постоянной мощности находим с помощью формулы [69]

$$M(N_e) = c \left[0,5 \left(a_1 \bar{M}_K + b_1 \bar{M}_K^2 + b_1 \sigma_M^2 \right) + \left(a_1 \bar{M}_K + b_1 \bar{M}_K^2 + b_1 \sigma_M^2 \right) \Phi(t_H) + \right. \\ \left. + \left(a_2 \bar{M}_K + b_2 \bar{M}_K^2 + b_2 \sigma_M^2 \right) \Phi(t_n) - \sigma_M \{ b_1 \varphi(t_H) \bar{M}_K + b_2 \varphi(t_n) \bar{M}_K \} \right] , \quad (3.39)$$

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

c – коэффициент, равен 9550^{-1} ;

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

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

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

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

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

σ_M – стандарт крутящего момента, Нм;

M_H – номинальное значение крутящего момента, Нм;

M_{Π} – предельное значение крутящего момента, Нм;

$a^{\bullet}, b^{\bullet}, a_1^{\bullet}, b_1^{\bullet}, a_2^{\bullet}, b_2^{\bullet}$ – расчетные коэффициенты, определяемые при

аппроксимации характеристики двигателя в зависимости от крутящего момента на коленчатом валу (таблица 3.1) [69].

Таблица 3.1 – 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^{\bullet}	$A_1 + A_3$
a_1^{\bullet}	$A_1 - A_2$
a_2^{\bullet}	$A_2 - A_3$
b^{\bullet}	$B_1 + B_3$
b_1^{\bullet}	$B_1 - B_2$
b_2^{\bullet}	$B_2 - B_3$

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

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

$$\bar{G}_T = 0,5 \left(a^* + b^* \bar{M}_K \right) + \left(a_1^* + b_1^* \bar{M}_K \right) \Phi(t_H) + \left(a_2^* + b_2^* \bar{M}_K \right) \Phi(t_n) - \sigma_P \{ (b_1^* \varphi(t_H) + b_2^* \varphi(t_n)) \}, \quad (3.40)$$

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

$a_1^*, b_1^*, a_2^*, b_2^*, a^*, b^*$ – расчетные коэффициенты, определяемые при аппроксимации тяговой характеристики трактора по расходу топлива (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Коэффициенты для расчета математических ожиданий часового расхода топлива трактора с двигателем постоянной мощности

Коэффициент	Расчетная формула
A_1^*	G_{TX}
A_2^*	$G_{TH} + \{ [G_{TH} - G_{TP}] / (\kappa_2 - 1) \}$
A_3^*	$G_{TP} + \{ (G_{TP} - G_{TO}) / (\kappa_1 - 1) \}$
B_1^*	$-(G_{TX} - G_{TH}) / M_H$
B_2^*	$-(G_{TH} - G_{TP}) / (M_{\Pi} - M_H)$
B_3^*	$-(G_{TP} - G_{TO}) / (M_{max} - M_{\Pi})$
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^*	$B_2^* - B_3^*$

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

Значения G_{TP}, G_{TO} находим по выражениям:

$$G_{TO} = 3,6 \cdot \frac{N_{emax} 10^3}{Q_H \cdot \eta_e},$$

$$G_{ТП} = 3,6 \cdot \frac{N_{e.П} \cdot 10^3}{Q_H \cdot \eta_e}, \quad (3.41)$$

где $\eta_e = (0,25-0,4)$ – эффективный КПД двигателя (данная переменная вводится последовательно в заданных пределах);

$$Q_H = 42500 \text{ кДж/кг};$$

$N_{e \max} = 9550^{-1} M_{\max} \times n_{\partial. \min}$ – данная переменная варьируется в пределах $M_{\max} = M_n \times (1,35-1,6)$;

$N_{e.П}$ – предельная мощность двигателя, кВт;

$$N_{e.П} = 9550^{-1} M_{П} \times n_{\partial. \min}, \quad M_{П} = M_n \times (1,15-1,3).$$

Для расчета математических ожиданий часовой производительности МТА в зависимости от переменной силы тяги трактора используется следующее выражение [31]:

$$M(W_q) = C_{w2} [M(N_{кр})], \quad (3.42)$$

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

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

K_a – удельное сопротивление агрегата, кН/м;

τ – степень использования времени работы агрегата;

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

Математическое ожидание тяговой мощности в трактора с двигателем постоянной мощности находим следующим образом [74]:

$$M(N_{кр}) = \left[0,5 \left(a_0^- \bar{P}_{кр} + b_0^- \bar{P}_{кр}^2 + b_0^- \sigma_P^2 \right) + \left(a_1^- \bar{P}_{кр} + b_1^- \bar{P}_{кр}^2 + b_1^- \sigma_P^2 \right) \Phi(\beta_H) + \right. \\ \left. + \left(a_2^- \bar{P}_{кр} + b_2^- \bar{P}_{кр}^2 + b_2^- \sigma_P^2 \right) \Phi(\beta_{П}) - \sigma_P \{ b_1^- \varphi(\beta_H) \bar{P}_{кр} + b_2^- \varphi(\beta_{П}) \bar{P}_{кр} \} \right], \quad (3.43)$$

где $\Phi(\beta_{П}) = (2\pi)^{-1/2} \int_0^{\beta_{П}} e^{-\beta^2/2} d\beta$ – функция Лапласа для аргумента

$\beta_{П}$;

$\Phi(\beta_H) = (2\pi)^{-1/2} \int_0^{\beta_H} e^{-\beta^2/2} d\beta$ – функция Лапласа для аргумента β_H ;

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

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

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

σ_P – стандарт силы тяги трактора;

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

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

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

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

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

Таблица 3.3 – Коэффициенты для расчета математических ожиданий тяговой мощности трактора с двигателем постоянной мощности

Коэффициент	Расчетная формула
1	2
A_1	$V_{p.x}$
A_2	$V_{p.H} + \{[V_{p.H} - V_{p.II}]/(\kappa_2 - 1)\}$
A_3	$V_{p.II} + \{(V_{p.II} - V_{p.min})/(\kappa_1 - 1)\}$
B_1	$-(V_{p.x} - V_{p.H})/P_{kp.H}$
B_2	$-(V_{p.H} - V_{p.II})/(P_{kp.II} - P_{kp.H})$
B_3	$-(V_{p.II} - V_{p.min})/(P_{kp.max} - P_{kp.II})$
a	$A_1 + A_3$
a_1	$A_1 - A_2$
a_2	$A_2 - A_3$
b	$B_1 + B_3$

1	2
b_1°	$B_1 - B_2$
b_2°	$B_2 - B_3$

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

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

$$P_{кр.max} = \frac{M_{max} \cdot i_{mp} \cdot \eta_{mp} \cdot 10^{-3}}{r_k} - (m_{\text{э}} \cdot g \cdot f), \quad (3.44)$$

где i_{mp} – передаточное число трансмиссии;

η_{mp} – механический КПД трансмиссии;

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

$m_{\text{э}}$ – эксплуатационная масса трактора;

f – коэффициент сопротивления качению;

g – ускорение силы тяжести.

В выражении (3.44) $M_{max} = M_n \times (1,35-1,6)$ последовательно.

Далее определяем $P_{кр.п}, P_{кр.н}$.

Скорость движения трактора V_{∂} на определенной передаче рассчитываем по формуле

$$V_{\partial} = \frac{\pi \cdot n_{\partial}}{30} \cdot \frac{r_k}{i_{mp}} (1 - \delta), \quad (3.45)$$

где n_{∂} – частота вращения коленчатого вала на данной передаче; мин⁻¹.

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

Аналогично рассчитываются математические ожидания часового расхода топлива \bar{G}_T [74]

$$\bar{G}_T = 0,5 \left(a^* + b^* \bar{P}_{kp} \right) + \left(a_1^* + b_1^* \bar{P}_{kp} \right) \Phi(t_n) + \left(a_2^* + b_2^* \bar{P}_{kp} \right) \Phi(t_n) - \sigma_P \{ (b_1^* \varphi(t_n) + b_2^* \varphi(t_n)) \}, \quad (3.46)$$

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

$a_1^*, b_1^*, a_2^*, b_2^*, a^*, b^*$ – расчетные коэффициенты, определяемые при аппроксимации тяговой характеристики трактора по расходу топлива (таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Коэффициенты для расчета математических ожиданий часового расхода топлива трактора с двигателем постоянной мощности

Коэффициент	Расчетная формула
A_1^*	G_{TX}
A_2^*	$G_{TH} + \{[G_{TH} - G_{TP}]/(\kappa_2 - 1)\}$
A_3^*	$G_{TP} + \{(G_{TP} - G_{TO})/(\kappa_1 - 1)\}$
B_1^*	$-(G_{TX} - G_{TH})/P_{кр.н}$
B_2^*	$-(G_{TH} - G_{TP})/(P_{кр.п} - P_{кр.н})$
B_3^*	$-(G_{TP} - G_{TO})/(P_{кр.мах} - P_{кр.п})$
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^*	$B_2^* - B_3^*$

$G_{TX}, G_{TH}, G_{TP}, G_{TO}$ – часовой расход топлива соответственно: холостого хода, номинальный, для предельного крутящего момента, при максимальном крутящем моменте, кг/ч; $\kappa_1 = P_{кр.мах}/P_{кр.п}$; $\kappa_2 = P_{кр.п}/P_{кр.н}$.

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

$$\bar{g}_e = \frac{\bar{G}_T}{\bar{N}_{kp}}, \quad (3.47)$$

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

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

Влияние колебаний силы тяги на тяговую мощность трактора с классической тяговой характеристикой оценивается с помощью формулы [31]

$$\bar{N}_{kp} = \bar{P}_{kp} \bar{V}_P + K_{pv}, \quad (3.48)$$

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

$$\bar{V}_P = 0,5(a^{**} + b^{**} \bar{P}_{kp}) - (a_1^{**} + b_1^{**} \bar{P}_{kp}) \Phi(t_H) + b_1^{**} \varphi(t_H) \sigma_P$$

– математическое ожидание рабочей скорости движения трактора на данной передаче, м/с;

$$K_{pv} = [0,5b^{**} - b_1^{**} \Phi(t_H)] \sigma_P^2 - \text{корреляционный момент};$$

$$A_1^{**} = V_x;$$

$$A_2^{**} = V_{p.n} + [(V_{p.n} - V_{\min}) / (K_1 - 1)];$$

$$B_1^{**} = -(V_x - V_{p.n}) / P_{кр.н};$$

$$B_2^{**} = -(V_{p.n} - V_{\min}) / [P_{кр.н} (K_1 - 1)] - \text{коэффициенты, определяемые по}$$

типовой характеристике трактора;

$$K_1 = \frac{P_{\max}}{P_{кр.н}} - \text{коэффициент максимальной нагрузки трактора на}$$

данной передаче;

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

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

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

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

P_{\max} – максимальное значение силы тяги, кН.

Для расчета математического ожидания удельного тягового расхода топлива $\bar{g}_{кр}$ используется соотношение [31]

$$\bar{g}_{кр} = \bar{G}_T / \bar{N}_{кр}, \quad (3.49)$$

где $\bar{G}_T = 0,5(a' + b' \bar{P}_{кр}) - (a'_1 + b'_1 \bar{P}_{кр})\Phi(t_H) + b'_1 \varphi(t_H)\sigma_P$ – математическое ожидание секундного расхода топлива на данной передаче, кг/ч;

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

$a' = A'_1 + A'_2, a'_1 = A'_2 - A'_1, b' = B'_1 + B'_2, b'_1 = B'_2 - B'_1$ – коэффициенты, определяемые по типовой тяговой характеристике;

$$A'_1 = G_{TX}; A'_2 = G_{TH} + [(G_{TH} - G_{TO}) / (K_1 - 1)];$$

$$B'_1 = (G_{TH} - G_{TX}) / P_{кр.н};$$

$$B'_2 = -(G_{TH} - G_{TO}) / [P_{кр.н} (K_1 - 1)];$$

$$K_1 = \frac{P_{\max}}{P_{кр.н}};$$

$G_{TX}, G_{TO}, G_{TH}, P_{\max}, P_{кр.н}$ – данные тяговой характеристики трактора.

В общем виде работу генетического алгоритма можно представить следующим образом [147]:

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

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

3. Применить оператор скрещивания.

4. Новые решения (потомки) подвергаются мутации.

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

6. Повторять 2–5, пока не выполнится условие остановки.

Для построения эволюционного алгоритма необходимо выполнить следующие шаги:

выбрать представление решений (способ кодирования фенотипа

в генотип);

решить, как инициализировать популяцию;

определить основные генетические операторы;

выбрать подходящий оператор мутации;

выбрать подходящий оператор скрещивания;

выбрать способ оценки пригодности индивида (варианта решения задачи);

решить, как управлять нашей популяцией;

решить, как выбрать индивидов-родителей;

решить, как выбрать индивидов для замены;

решить, когда остановить алгоритм.

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

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

$$f(d) \rightarrow \underset{d \in D}{opt},$$

где $f : D \rightarrow R^1$,

а задачу $\mu(s) \rightarrow \underset{s \in S}{opt}$,

$$\text{где } \mu : S \rightarrow R^1 \text{ и } s = e(x), \mu(s) = f(e^{-1}(s)) = f(x). \quad (3.50)$$

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

$$\chi(X) \rightarrow \underset{X \in B_{2n}}{opt}, \text{ где } \chi : B_{2n} \rightarrow R^1. \quad (3.51)$$

К задачам (3.50) и (3.51) 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 используются стандартное бинарное кодирование и бинарные коды Грея [147]. Дальнейшие составляющие работы стандартного ГА были рассмотрены в подразделе 3.3.

3.7. Генетический алгоритм решения многокритериальной задачи оптимизации энергозатрат при использовании мобильных сельскохозяйственных агрегатов

На основе общего эволюционного алгоритма и его составляющих многокритериальных генетических алгоритмов разработан ряд методов решения оптимизационных задач. Одним из наиболее распространенных является метод VEGA–VectorEvalutedGeneticAlgorithm [59, 154].

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 (популяция – множество решений задачи) множества решений задачи, отобранных по каждому из частных критериев, т.е. 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 3.12) [59].

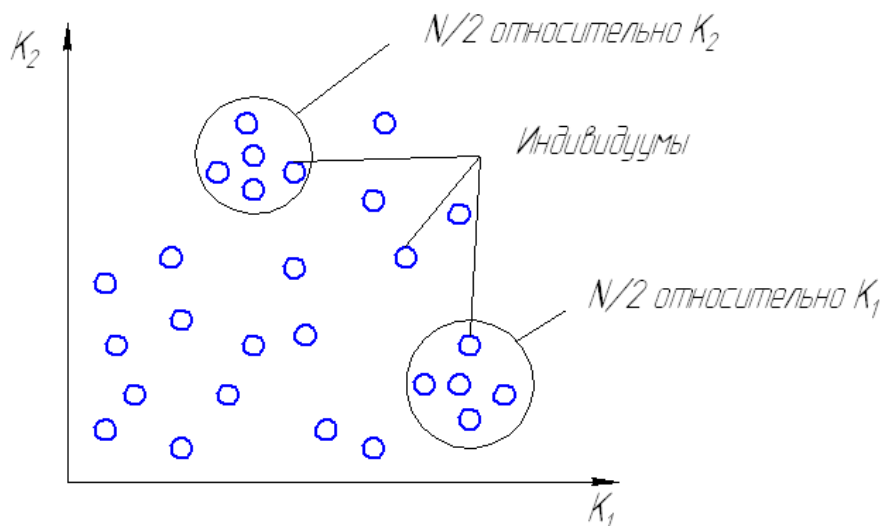


Рисунок 3.12 – Пропорциональная селекция в методе VEGA: K_1 и K_2 – критерии

На рисунке 3.12 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, неулучшаемым), 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 .

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 выход-

ными 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 в составе машинных комплексов по возделыванию сельскохозяйственных культур определяются двумя основными составляющими [161, 162]:

основные прямые топливно-энергетические затраты;

энергозатраты, обусловленные несоблюдением оптимальных параметров и режимов работы агрегатов.

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

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 двух 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.

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 ко-

да. 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

$$interval_i = \frac{b_i - a_i}{\omega_i}. \quad (3.52)$$

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

$$n = \sum_i^m n_i. \quad (3.53)$$

Например, фенотип (фенотип – параметр задачи, закодированный из вещественного числа в бинарную строку) и генотип функции, выраженной тремя переменными, имеющими длину бинарного кода в три, пять и четыре бита соответственно выглядит следующим образом (рисунок 3.13).

1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	0	1	Генотип
x			y					z				Фенотип

Рисунок 3.13 – Пример генотипа и фенотипа функции многих переменных

Для инициализации начальной популяции нужно определить размер популяции (N), т.е. множество индивидов, обрабатываемых в одной итерации работы ГА (поколении). Инициализация начальной популяции производится случайно, т.е. 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. Для этого требуется сначала создать какую-либо структуру (или массив), которая будет хранить в себе 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.

Положив, 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:

$$B_k = \oplus_{i=k}^N G_i, \quad (3.54)$$

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», также 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

$$y = a_i + d_i \cdot \omega_i, \quad (3.55)$$

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 [142]:

для задачи максимизации:

$$fitness_k = \begin{cases} \frac{f(x_k) - I^{min}}{I^{max} - I^{min}}, & \text{если } I^{max} \neq I^{min}; \\ 1, & \text{если } I^{max} = I^{min}. \end{cases} \quad (3.56)$$

$$\begin{aligned} I^{min} &= \min_{x \in Y} f(x), \\ I^{max} &= \max_{x \in Y} f(x); \end{aligned} \quad (3.57)$$

где 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:

$$fitness_k = \begin{cases} \frac{I^{max} - f(x_k)}{I^{max} - I^{min}}, & \text{если } I^{max} \neq I^{min}; \\ 1, & \text{если } I^{max} = I^{min}. \end{cases} \quad (3.58)$$

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

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 [142]

$$p_k = \frac{fitness_k}{\sum_{j=1}^N fitness_j}. \quad (3.59)$$

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 3.14).

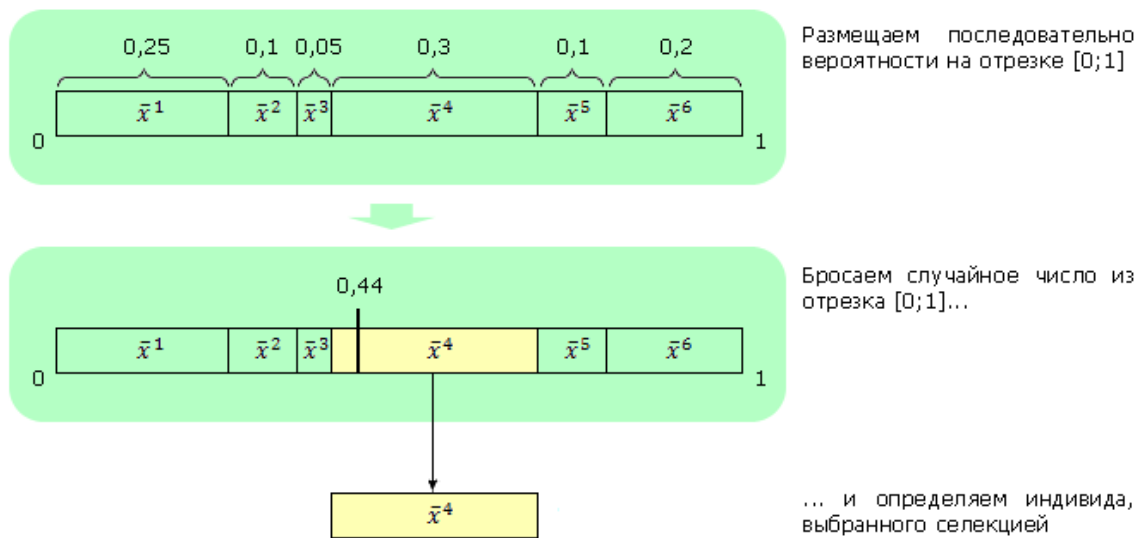


Рисунок 3.14 – Пропорциональная селекция

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 (рисунок 3.15).

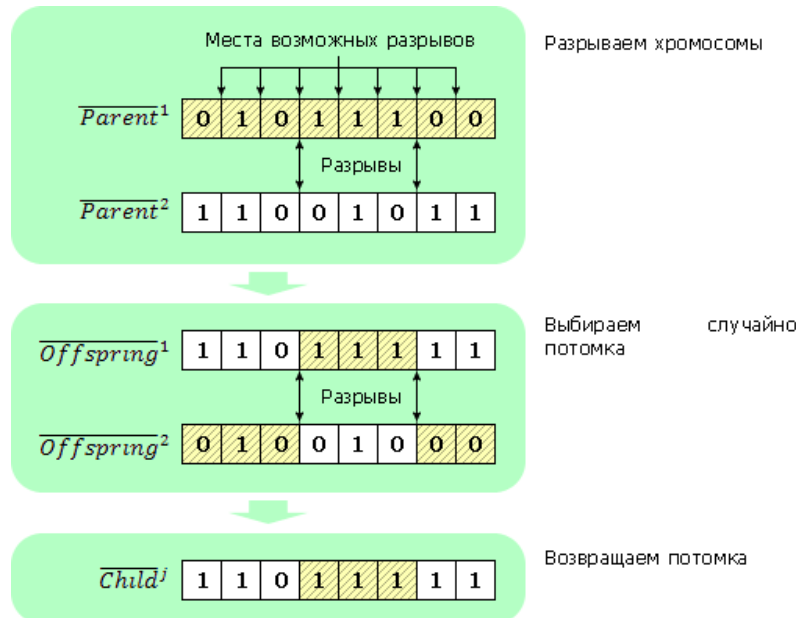


Рисунок 3.15 – Двухточечное скрещивание

Мутация. Мутация – оператор случайного изменения всех потомков из популяции. Цель данного оператора – не получить более лучшее решение, а разнообразить 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.

$$p(mut) = \begin{cases} \frac{1}{3n}, & \text{если мутация слабая;} \\ \frac{1}{n}, & \text{если мутация средняя;} \\ \min\left(\frac{3}{n}, 1\right), & \text{если мутация сильная,} \end{cases} \quad (3.60)$$

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

Пример мутации одного из индивидов показан на рисунке 3.16 [142].

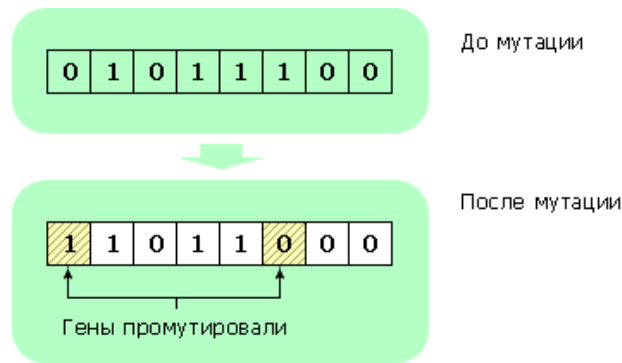


Рисунок 3.16 – Мутация

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.

Схема формирования новой популяции показана на рисунке 3.17.

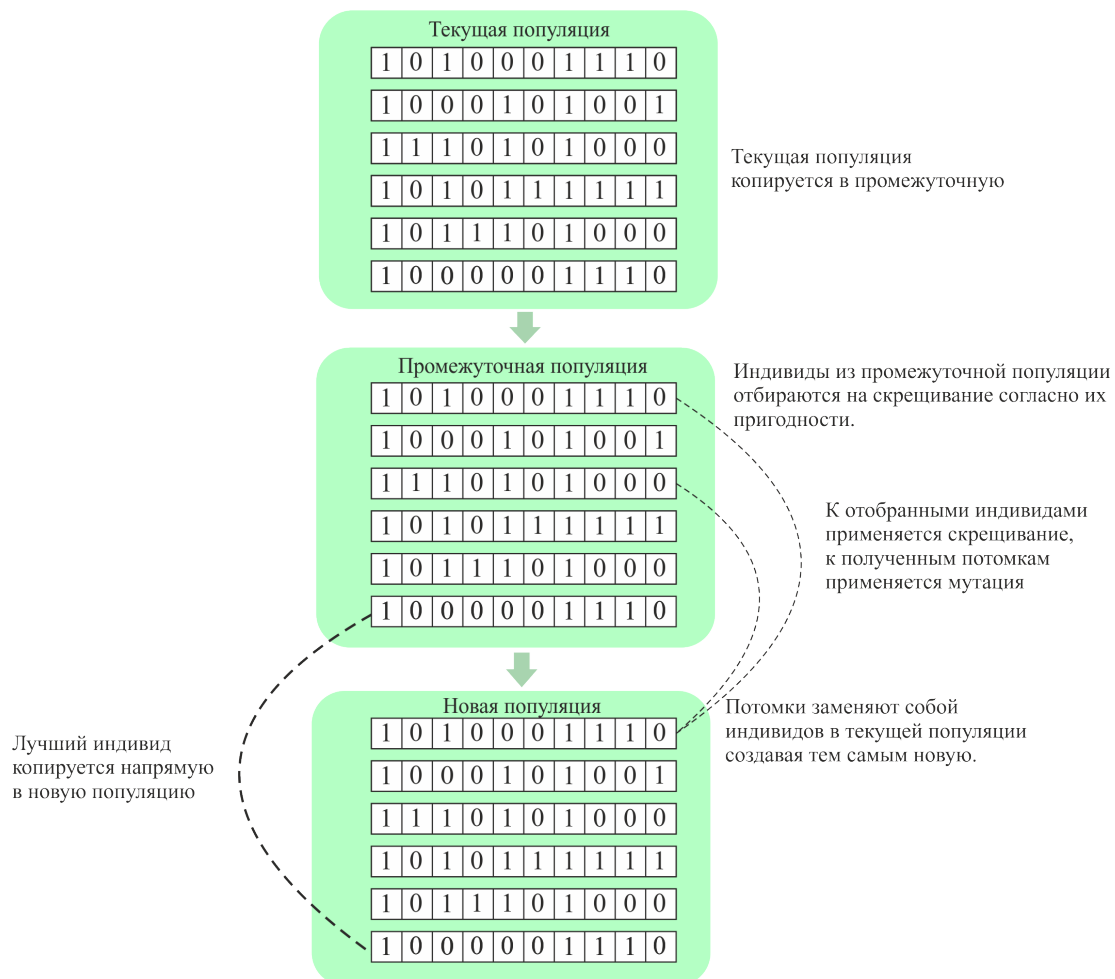


Рисунок 3.17 – Формирование новой популяции

Порядок работы с алгоритмом нахождения оптимальных значений параметров двигателя и трактора при помощи многокритериального ГА следующий:

1. Указываем области определения для всех переменных задачи оптимизации (0: n_x; 1: n_nom; 2: n_min; 3: M_nom; 4: M_k; 5: k; 6: vm; 7: Gt_x; 8: Gt_nom; 9: k_ob).

2. Далее следует ввод параметров генетического алгоритма:

размер популяции означает, сколько индивидов будет в популяции, с помощью которой осуществляется поиск;

число поколений: рекомендуются значения от 100 до 1000;

тип мутации: 1 – низкая мутация, 2 – средняя мутация. 3 – высокая мутация;

число прогонов: количество запусков алгоритма с заданными выше параметрами.

Модифицированный алгоритм имеет следующие отличия от упоминаемого ранее алгоритма VEGA.

1. В части записи лучшей точки: в данном месте работает принцип Парето, т.е. мы записываем решение в качестве лучшего, если по одному из критериев есть улучшение, а по другому критерию будет строго не хуже.

```
//-----  
// Проверка, не является ли найденное решение лучшим  
//-----  
if(best[0] >= functional[0][i] && best[1] <= functional[1][i]){ //Если  
одно значение лучше и другое не хуже, чем было  
if (best[0] != functional[0][i] || best[1] != functional[1][i]){  
best[0]=functional[0][i];  
best[1]=functional[1][i];  
for (int j = 0; j < numb_of_variables; j++){  
best_pos[j] = point[j]; //Сохранение координат лучшей точки  
}  
find_itr = gener; //Записываем номер поколения  
for (int s = 0; s < len; s++){  
superman[s] = population[i][s]; //Сохранение генотипа лучшей  
точки  
}  
doom = 0;  
}
```

```
delete[] point; // Удаление массива со значением координаты в десятичной форме
```

```
    }  
    int** inter_popul = new int*[popul_size]; // Создание промежуточной популяции для взятия индивидов на генетические операции  
    for (inti = 0; i < popul_size; i++){  
        inter_popul[i] = new int[len];  
    }
```

2. Второе отличие в части селекции. Данное отличие реализовано следующим образом: подпопуляции условные, создается промежуточная популяция, которая заполняется в два этапа: первая половина на основе оценки пригодности по расходу топлива, вторая половина на основе мощности. Далее при смешивании создается массив номеров и производится смешивание, затем для скрещивания берутся индивиды по номеру из этого массива, номер берется случайно.

```
    Int** inter_popul = new int*[popul_size]; // Создание промежуточной популяции для взятия индивидов на генетические операции
```

```
    for (inti = 0; i < popul_size; i++){  
        inter_popul[i] = new int[len];  
    }
```

```
    //-----
```

```
    // Подпопуляция для Gt
```

```
    //-----
```

```
    fitness_filling (popul_size,functional[0],0); //
```

```
    Вычисление функции пригодности
```

```
    proportional_sel(fitness,popul_size); // Пропорциональная селекция
```

ция

```
    intrazdel = popul_size/2;
```

```
    for (inti = 0; i < razdel; i++){
```

```
        for (int j = 0; j < len; j++){
```

```
            inter_popul[i][j] = population[lucky(possible,popul_size)][j];
```

```
        }
```

```
    }
```

```
    //-----
```

```
    // Подпопуляция для Ne
```

```
    //-----
```

```
    fitness_filling (popul_size,functional[1],1);//
```

```
    Вычисление функции пригодности
```

```

пропорциональная селекция
proportional_sel (fitness, popul_size); // Пропорциональная селекция
for (inti = razdel; i < popul_size; i++){
for (int j = 0; j < len; j++){
inter_popul[i][j] = population [lucky (possible, popul_size)] [j];
}
}
int* positions = new int[popul_size];
for (inti = 0; i < popul_size; i++){
positions[i] = i;
}
//-----
// Перемешивание промежуточной популяции
//-----
for(inti = 0; i < 1000; i++){
int buff = 0;
int number1 = 0, number2 = 0;
number1 = rand()%popul_size;
do {
number2 = rand()%popul_size;
} while(number1 == number2);
buff = positions[number1];
positions[number1] = positions[number2];
positions[number2] = buff;
}
//-----
//Скрещивание (двухточечное)
//-----
for(inti = 0; i < popul_size - 1; i++){
cross_2(inter_popul[positions[rand()%popul_size]], inter_popul[positions[rand()%popul_size]], population[i], len);
}

```

Оптимальные значения целевых функций в конце работы алгоритма имеют следующий вид:

ПОИСК ОПТИМАЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Прогон №1

Лучшая точка (2385,2200,1560,260,243,1.12,0.2,11,14,1.35),

значение функции $Ne = 48.2541$, $Gt = 13.1915$ найдена в 144 поколениях.

Прогон №2

Лучшая точка (2369,2194,1560,259,245,1.12,0.2,11,14,1.35),
значение функции $Ne = 47.6866$, $Gt = 13.158$ найдена в 140 поколении.

Расчет проведен на примере колесного трактора, относящегося к классу тяги 14 кН.

3.8. Целевые функции оптимизационной задачи и расчет энергозатрат с помощью многокритериального генетического алгоритма оптимизации

В пункте 3.7 представлен многокритериальный генетический алгоритм оптимизации энергозатрат. При этом используются следующие целевые функции оптимизационной задачи.

Математическое ожидание эффективной мощности ДПМ находим с помощью формулы

$$\bar{N}_e = 9550^{-1} \left[0,5(a \bar{M}_k + b \bar{M}_k^2 + b \sigma_M^2) + (a_1 \bar{M}_k + b_1 \bar{M}_k^2 + b_1 \sigma_M^2) \Phi(t_H) + \right. \\ \left. + (a_2 \bar{M}_k + b_2 \bar{M}_k^2 + b_2 \sigma_M^2) \Phi(t_{II}) - \sigma_M \{ b_1 \varphi(t_H) \bar{M}_k + \right. \\ \left. + b_2 \varphi(t_{II}) \bar{M}_k \} \right], \quad (3.61)$$

где \bar{M}_k – текущее среднее значение крутящего момента, Нм;

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

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

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

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

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

σ_M – стандарт крутящего момента, Нм;

M_H – номинальное значение крутящего момента, Нм;

M_{II} – предельное значение крутящего момента, Нм;

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 (см. таблицу 2.1).

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

$$\begin{aligned} \bar{G}_T = & 0,5(a^* + b^* \bar{M}_K) + (a_1^* + b_1^* \bar{M}_K) \Phi(t_n) + (a_2^* + b_2^* \bar{M}_K) \Phi(t_n) - \\ & - \sigma_M \{(b_1^* \varphi(t_n) + b_2^* \varphi(t_n))\}, \end{aligned} \quad (3.62)$$

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

$a_1^*, b_1^*, a_2^*, b_2^*, a^*, b^*$ – расчетные коэффициенты, определяемые при аппроксимации тяговой характеристики трактора по расходу топлива (см. таблицу 2.2).

Значения $G_{ТП}$, $G_{ТО}$ находим по выражениям:

$$G_{ТО} = 3,6 \cdot \frac{N_{e\max} 10^3}{Q_H \cdot \eta_e}; \quad (3.63)$$

$$G_{ТП} = 3,6 \cdot \frac{N_{e.П} \cdot 10^3}{Q_H \cdot \eta_e},$$

где $\eta_e = (0,25-0,4)$ – эффективный КПД двигателя (данная переменная вводится последовательно в заданных пределах);

$$Q_H = 42500 \text{ кДж/кг};$$

$N_{e\max} = 9550^{-1} M_{\max} \times n_{\partial.\min}$ – данная переменная варьируется в пределах $M_{\max} = M_n \times (1,35-1,6)$;

$N_{e.П}$ – предельная мощность двигателя, кВт;

$$N_{e.П} = 9550^{-1} M_{П} \times n_{\partial.\min}, \quad M_{П} = M_n \times (1,15-1,3).$$

Влияние колебаний силы тяги на тяговую мощность трактора с классической характеристикой оценивается с помощью формулы

$$\bar{N}_{kp} = \bar{P}_{kp} \bar{V}_P + K_{pv}, \quad (3.64)$$

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

$\bar{V}_p = 0,5(a^{**} + b^{**} \bar{P}_{kp}) - (a_1^{**} + b_1^{**} \bar{P}_{kp}) \Phi(t_H) + b_1^{**} + \varphi(t_H) \sigma_p$ – математическое ожидание рабочей скорости движения трактора на данной передаче (см. рисунок 2.4, в), м/с;

$K_{pv} = [0,5b^{**} - b_1^{**} \Phi(t_H)] \sigma_p^2$ – корреляционный момент; $A_1^{**} = V_x$;

$A_2^{**} = V_{p.n} + [(V_{p.n} - V_{\min}) / (K_1 - 1)]$;

$B_1^{**} = -(V_x - V_{p.n}) / P_{kp.n}$;

$B_2^{**} = -(V_{p.n} - V_{\min}) / [P_{kp.n} (K_1 - 1)]$ – коэффициенты, определяемые по типовой характеристике трактора;

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

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

$\Phi(t_n)$ и $\varphi(t_n)$ – функции аргумента $t_n = (P_{kp.n} - \bar{P}_k) / \sigma_p$;

$\bar{P}_{k.p}$, σ_p – среднее значение и среднеквадратическое отклонение тяговой силы трактора на данной передаче, кН;

$P_{kp.n}$ – номинальное значение силы тяги;

P_{\max} – максимальное значение силы тяги, кН.

Для расчета математического ожидания расхода топлива \bar{G}_T используется соотношение

$$\bar{G}_T = 0,5(a' + b' \bar{P}_{kp}) - (a'_1 + b'_1 \bar{P}_{kp}) \Phi(t_n) + b'_1 \varphi(t_n) \sigma_p, \quad (3.65)$$

где $a' = A'_1 + A'_2$, $a'_1 = A'_2 - A'_1$, $b' = B'_1 + B'_2$, $b'_1 = B'_2 - B'_1$ – коэффициенты, определяемые по типовой тяговой характеристике;

$A'_1 = G_{TX}$; $A'_2 = G_{TH} + [(G_{TH} - G_{TO}) / (K_1 - 1)]$;

$B'_1 = (G_{TH} - G_{TX}) / P_{kp.n}$;

$B'_2 = -(G_{TH} - G_{TO}) / [P_{kp.n} (K_1 - 1)]$;

$K_1 = \frac{P_{\max}}{P_{kp.n}}$;

$G_{TX}, G_{TO}, G_{TH}, P_{\max}, P_{kp.n}$ – данные тяговой характеристики трактора.

Математическое ожидание тяговой мощности ДПМ находим следующим образом:

$$M(N_{KP}) = \left[0,5 \left(a^{\circ} \bar{P}_{KP} + b^{\circ} \bar{P}_{KP}^2 + b^{\circ} \sigma_P^2 \right) + \left(a_1^{\circ} \bar{P}_{KP} + b_1^{\circ} \bar{P}_{KP}^2 + b_1^{\circ} \sigma_P^2 \right) \Phi(\beta_H) + \right. \\ \left. + \left(a_2^{\circ} \bar{P}_{KP} + b_2^{\circ} \bar{P}_{KP}^2 + b_2^{\circ} \sigma_P^2 \right) \Phi(\beta_{II}) - \sigma_P \{ b_1^{\circ} \varphi(\beta_H) \bar{P}_{KP} + \right. \\ \left. + b_2^{\circ} \varphi(\beta_{II}) \bar{P}_{KP} \} \right], \quad (3.66)$$

где $\Phi(\beta_{II}) = (2\pi)^{-1/2} \int_0^{\beta_{II}} e^{-\beta^2/2} d\beta$ – функция Лапласа для аргумента β_{II} ;

$\Phi(\beta_H) = (2\pi)^{-1/2} \int_0^{\beta_H} e^{-\beta^2/2} d\beta$ – функция Лапласа для аргумента β_H ;

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

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

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

σ_P – стандарт силы тяги трактора;

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

$a_1^{\circ}, b_1^{\circ}, a_2^{\circ}, b_2^{\circ}$ – расчетные коэффициенты, определяемые при аппроксимации тяговой характеристики трактора (см. таблицу 2.3);

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

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

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

$$P_{кр.мах} = \frac{M_{мах} \cdot i_{mp} \cdot \eta_{mp} \cdot 10^{-3}}{r_k} - (m_{\vartheta} \cdot g \cdot f), \quad (3.67)$$

где i_{mp} – передаточное число трансмиссии;

η_{mp} – механический КПД трансмиссии;

r_K – расчетный диаметр ведущего колеса или кинематический радиус ведущей звездочки, м;

$m_{\text{э}}$ – эксплуатационная масса трактора, т;

f – коэффициент сопротивления качению;

g – ускорение силы тяжести, м/с².

В выражении (3.67) $M_{\text{max}} = M_n \times (1,35-1,6)$ последовательно.

Далее по формуле (3.67) определяем $P_{кр.н}$, $P_{кр.н}$, учитывая значения предельного момента на валу двигателя M_n и номинального момента M_n . Скорость движения трактора V_{∂} на определенной передаче рассчитываем по формуле

$$V_{\partial} = \frac{\pi \cdot n_{\partial}}{30} \cdot \frac{r_K}{i_{mp}} (1 - \delta), \quad (3.68)$$

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

δ – буксование трактора, допустимое буксование трактора в расчетах принимают: колесных с формулой 4K2 – 16%, или 0,16, с формулой 4K4 – 14%, или 0,14, гусеничных – 5%.

Аналогично рассчитываются математические ожидания часового расхода топлива \bar{G}_T .

$$\begin{aligned} \bar{G}_T = & 0,5(a^* + b^* \bar{P}_{kp}) + (a_1^* + b_1^* \bar{P}_{kp})\Phi(t_n) + (a_2^* + b_2^* \bar{P}_{kp})\Phi(t_n) - \\ & - \sigma_p \{ (b_1^* \varphi(t_n) + b_2^* \varphi(t_n)) \}, \end{aligned} \quad (3.69)$$

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

$a_1^*, b_1^*, a_2^*, b_2^*, a^*, b^*$ – расчетные коэффициенты, определяемые при аппроксимации тяговой характеристики трактора по расходу топлива (см. таблицу 2.4).

Суммарные энергозатраты при использовании МТА с учетом результата работы алгоритма решения многокритериальной задачи оптимизации работы МТА можно определить по формуле

$$E_{mta} = E_{ОПР} + E_A, \quad (3.70)$$

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

E_{OPP} – 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:

$$\bar{E}_{opr} = \frac{C_E \cdot \bar{G}_T}{\bar{N}_e}, \quad (3.71)$$

где \bar{E}_{opr} – математическое ожидание основных прямых топливно-энергетических энергозатрат;

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

a_T – энергетический эквивалент дизельного топлива, равный 42,5 МДж/кг;

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 – математическое ожидание эффективной мощности дизеля, кВт (рассчитывается по выражениям (3.61) и (3.66)).

Для определения среднего значения E_A предлагается использовать выражение

$$\bar{E}_A = \frac{\sum_{i=1}^{N_i-1} (C_{Pi} \cdot \bar{W}_q \cdot T_{cm} \cdot n_{cm}) + N^1 \cdot C_{Pi} \cdot \bar{W}_q \cdot T_{cm} \cdot n_{cm}}{S_0}, \quad (3.72)$$

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

$$C_{Pi} = Y \cdot \Delta y \cdot Q / 100, \quad (3.73)$$

где Y – планируемая урожайность, кг/га; $Y = 2500$ кг.

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

N_i – число целых дней в N^1 ;

S_0 – объем работы на данной операции, га;

\bar{W}_q – среднее значение производительности агрегата, га/ч;

Q – энергоемкость одного килограмма продукта, МДж/кг (таблица 3.5).

Таблица 3.5 – 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

$$N^1 = \frac{S_0}{\overline{W}_ч \cdot T_{см} \cdot n_{см}}, \quad (3.74)$$

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

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

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

Значения Δy устанавливаются с учетом условий природно-климатических зон, либо могут быть приняты по таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Уменьшение потерь урожая Δy на 1 день сокращения периода полевых работ, %

Вид работы	Δy	Культура	Δy	
			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

Определение величины потерь энергии E_A с использованием выражения (3.74) необходимо осуществлять путем сравнения базового значения производительности $W_б$, которое соответствует номинальному режиму работы МТА, и оптимального значения $W_{опт}$, которое

соответствует оптимальному режиму работы агрегата с учетом негативного влияния колебаний внешней погрузки.

Базовое значение производительности МТА W_6 и оптимальное значение $W_{\text{опт}}$ необходимо в данном случае определять по выражению

$$M(W_q) = C_{w1} [M(N_e)] , \quad (3.75)$$

где $M(W_q)$ или \bar{W}_q – математическое ожидание производительности агрегата, га/ч;

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

η_T – тяговый КПД трактора;

K_a – удельное сопротивление агрегата, кН/м;

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

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

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

$$M(W_q) = C_{w2} [M(N_{KP})] , \quad (3.76)$$

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

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

K_a – удельное сопротивление агрегата, кН/м;

τ – степень использования времени работы агрегата;

$M(N_{KP})$ – математическое ожидание тяговой мощности на данной передаче, кВт.

По формуле (3.76) находим \bar{W}_q^* – среднее значение часовой производительности, соответствующее оптимальному нагрузочному режиму двигателя, га/ч ($W_{\text{опт}}$), и \bar{W}_{q_n} – среднее значение часовой производительности агрегата в области номинального режима (W_6).

Оптимальное и базовое значения топливно-энергетических затрат $\bar{E}_{\text{опрОПТ}}$ и $\bar{E}_{\text{опрБАЗ}}$ с учетом переменных внешних воздействий на агрегат определяются по (3.70).

Обобщающий критерий оценки влияния оптимальных параметров и режимов работы МТА на энергозатраты технологического процесса E_{MTA} определяется по соотношению

$$\lambda^*_{\bar{E}_{MTA}} = \bar{E}^*_{MTA} / \bar{E}_{MTA6}, \quad (3.77)$$

где $\lambda^*_{\bar{E}_{MTA}}$ – 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.

В таблице 3.7 представлены значения ΔE_{ni} и E_{ai} для одной из природно-климатических зон Красноярского края.

Таблица 3.7 – Чувствительность энергопродуктивности ΔE_{ni} яровой пшеницы к энерготехнологическим воздействиям E_{ai} в Восточной Сибири при средней урожайности 32 ц/га

Вид энергетического воздействия E_{ai}	Прибавка, %	Прибавка, ц/га	Энергосо-державшие прибавки, МДж/га	Энергозатраты E_{ai} , МДж/га	Чувствительность энергосопрежения ΔE_{ni}
Обработка почвы под пар с внесением удобрений	20	6,40	8192	6067	1,36
Посев с внесением минеральных удобрений	6	2,88	3686	2514	1,46
Зяблевая вспашка	5	1,60	2048	1557	1,32
Подготовка семян к посеву	3,5	1,12	1434	263	5,46
Лущение	4	1,28	1638	554	2,96
Предпосевная культивация	4	1,28	1638	246	6,66
Химпрополка	4	1,28	1638	255	6,42
Обработка ядами	4	1,28	1638	255	6,42
Закрытие влаги	3	0,96	1228	199	6,18
Боронование всходов	2	0,64	820	199	4,12

Коэффициент η_{ai} с учетом эффективности использования оптимальных режимов работы МТА можно рассчитать по формуле

$$\eta_{ai} = \Delta E_{ni} / (\sum_{i=1}^n E_{ai} \cdot \lambda_{\bar{E}_{MTA}}^*). \quad (3.78)$$

3.9. Методика однокритериальной оптимизации машинно-тракторных характеристик с использованием генетических алгоритмов

Критериями данной оптимизационной задачи являются мощность двигателя N_e и трактора $N_{кр}$, часовой (массовый) расход топлива G_T , удельный расход топлива g_e или $g_{кр}$, определяемые своими целевыми функциями. Оптимальные значения мощности и расхода топлива, установленные с помощью ГА, позволяют рассчитать величину энергозатрат $E_{мта}$ и оценить их спомощью критериев η_{ai} и $\lambda_{\bar{E}_{MTA}}^*$.

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

Данную методику можно применить к задаче определения оптимальных значений параметров работы МТА. Под целевыми функциями здесь рассматриваются зависимости для расчета средних значений важнейших энергетических показателей двигателя и трактора, входящего в состав мобильного агрегата, который выполняет технологические операции по возделыванию сельскохозяйственных культур [78]. Использование ГА позволяет найти «наилучшие» значения переменных оптимизационной задачи, использование которых дает возможность установления оптимальных характеристик двигателя, трактора и МТА в целом. За основу метода однокритериальной оптимизации параметров сельскохозяйственных агрегатов выбран стандартный генетический алгоритм.

Блок-схема работы стандартного генетического алгоритма представлена на рисунке 3.18.

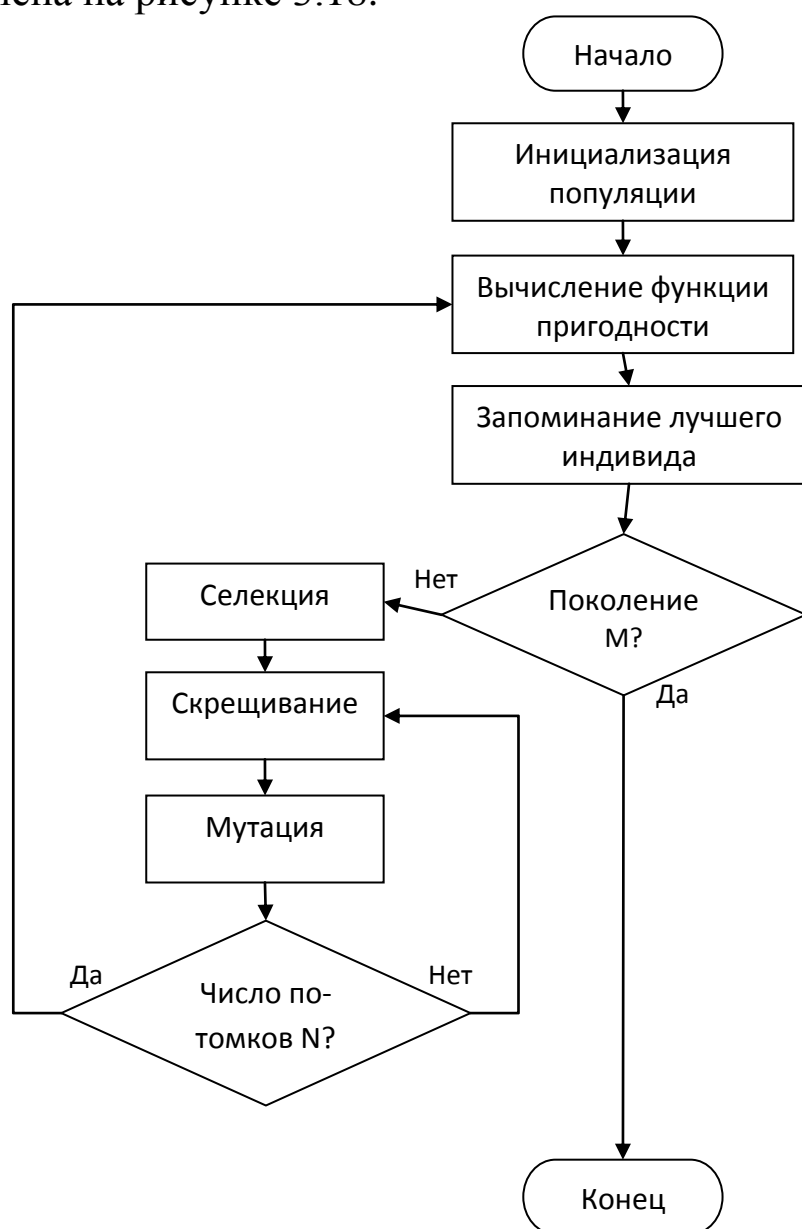


Рисунок 3.18 – Блок-схема стандартного генетического алгоритма

Инициализация. На шаге инициализации задаются параметры алгоритма: длина хромосомы, размер популяции и др. Если априорные сведения о пространстве поиска отсутствуют, начальная популяция генерируется случайным образом [142].

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 ко-

да. Для этого на первом этапе работы ГА необходимо произвести следующие действия:

определить m – число переменных в оптимизируемой функции;

задать области допустимых значений для функций;

задать для каждой переменной точность, с которой будет выполняться поиск;

вычислить необходимую длину бинарной строки для каждой переменной;

вычислить общую длину генотипа.

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

$$interval_i = \frac{b_i - a_i}{\omega_i}. \quad (3.79)$$

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:

$$n = \sum_i^m n_i. \quad (3.80)$$

Например, фенотип и генотип функции, выраженной тремя переменными, имеющими длину бинарного кода в три, пять и четыре бита соответственно, выглядит следующим образом (рисунок 3.19).

1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	0	1	Генотип
x			y					z				Фенотип

Рисунок 3.19 – Пример генотипа и фенотипа функции многих переменных

Для инициализации начальной популяции нужно определить размер популяции (N), т.е. множество индивидов, обрабатываемых в одной итерации работы ГА (поколении). Инициализация начальной популяции производится случайно, т.е. 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. Целевые функции поставленной оптимизационной задачи, определяющие характер критериев, могут быть представлены в виде следующих выражений:

$$\begin{aligned}(n_d, N_e, G_m, g_e, W_u) &= f(M_k), \\ (V_p, N_{кр}, G_T, g_{кр}, W_u) &= f(P_{кр}),\end{aligned}\tag{3.81}$$

где M_k – крутящий момент на коленчатом валу двигателя трактора, Нм;

$P_{кр}$ – сила тяги на крюке трактора, кН;

N_e – эффективная мощность двигателя, кВт;

W_u – часовая производительность, га/ч;

G_T – часовой расход топлива, кг/ч;

g_e – удельный расход топлива, г/(кВт·ч);

$N_{кр}$ – тяговая мощность;

$g_{кр}$ – удельный тяговый расход топлива, г/(кВт·ч);

V_p – скорость движения агрегата, м/с.

В качестве целевых функций однокритериальной оптимизационной задачи служат выражения (3.61; 3.62; 3.64–3.66; 3.68; 3.69).

Поскольку в алгоритме решения представлены двоичными строками – генотипом, для оценки индивида необходимо перейти от генотипа к фенотипу. Для этого требуется сначала создать какую-либо структуру или массив, которая будет хранить в себе 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 раз-

рядов 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.

Положив, 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:

$$B_k = \oplus_{i=k}^N G_i, \quad (3.82)$$

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», также 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

$$y = a_i + d_i \cdot \omega_i, \quad (3.83)$$

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 [142]:

для задачи максимизации:

$$fitness_k = \begin{cases} \frac{f(x_k) - I^{min}}{I^{max} - I^{min}}, & \text{если } I^{max} \neq I^{min}; \\ 1, & \text{если } I^{max} = I^{min}, \end{cases} \quad (3.84)$$

где

$$\begin{aligned} I^{min} &= \min_{x \in Y} f(x), \\ I^{max} &= \max_{x \in Y} f(x); \end{aligned} \quad (3.85)$$

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:

$$fitness_k = \begin{cases} \frac{I^{max} - f(x_k)}{I^{max} - I^{min}}, & \text{если } I^{max} \neq I^{min}; \\ 1, & \text{если } I^{max} = I^{min}. \end{cases} \quad (3.86)$$

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 турнирная селекция.

Турнирная селекция. В турнирной селекции индивиды из всей популяции с равной вероятностью могут попасть в группу размера $2 \leq T \leq N$, эта группа называется турниром. Из данной группы выбирается индивид с наибольшей пригодностью, он далее участвует в скрещивании.

При этом каждый индивид может попасть в группу на одной итерации только один раз. Например, если индивид с номером i был отобран в группу, то следующий индивид в группу выбирается с равной вероятностью из всех оставшихся индивидов в популяции. На следующей итерации набор в группу снова производится из всей популяции с последовательным исключением отобравшихся в группу индивидов [142].

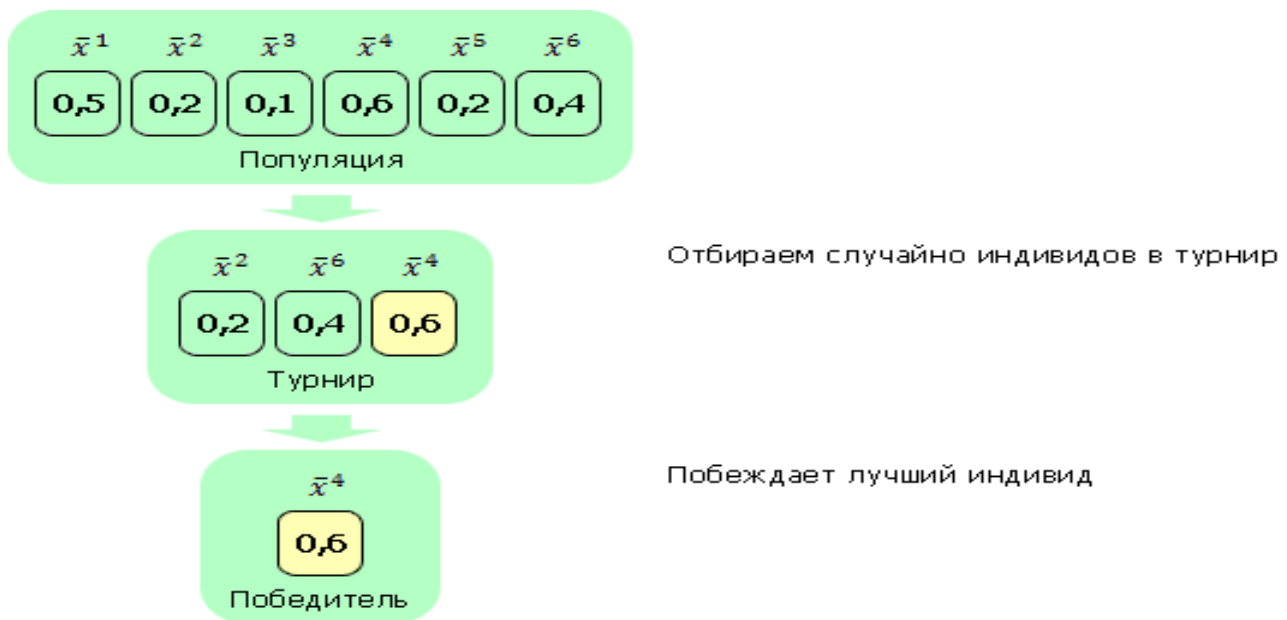


Рисунок 3.20 – Механизм турнирной селекции

Скрещивание. Скрещивание (кроссовер) – оператор случайного формирования нового индивида из двух выбранных родителей 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 в обеих хромосомах. После этого хромосомы обмениваются частями, в результате чего образуются два

потомка. Из них выбирается случайно один потомок, который и передается в качестве результата оператора скрещивания [142].



Рисунок 3.21 – Двухточечное скрещивание

Мутация. Мутация – оператор случайного изменения всех потомков из популяции. Цель данного оператора – не получить более лучшее решение, а разнообразить 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.

$$p(mut) = \begin{cases} \frac{1}{3n}, & \text{если мутация слабая;} \\ \frac{1}{n}, & \text{если мутация средняя;} \\ \min\left(\frac{3}{n}, 1\right), & \text{если мутация сильная,} \end{cases} \quad (3.87)$$

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

Пример мутации одного из индивидов показан на рисунке 3.22 [142].

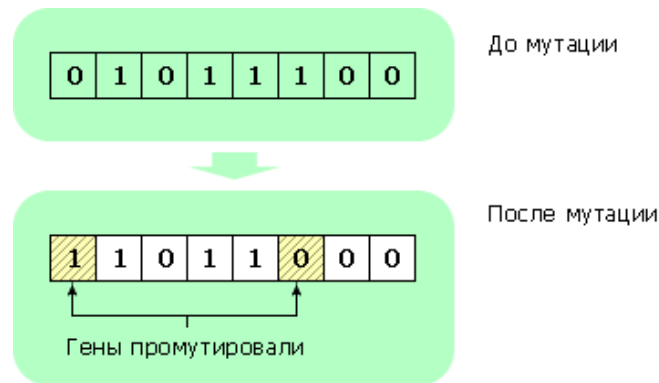


Рисунок 3.22 – Мутация

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.

Схема формирования новой популяции показана на рисунке 3.23.

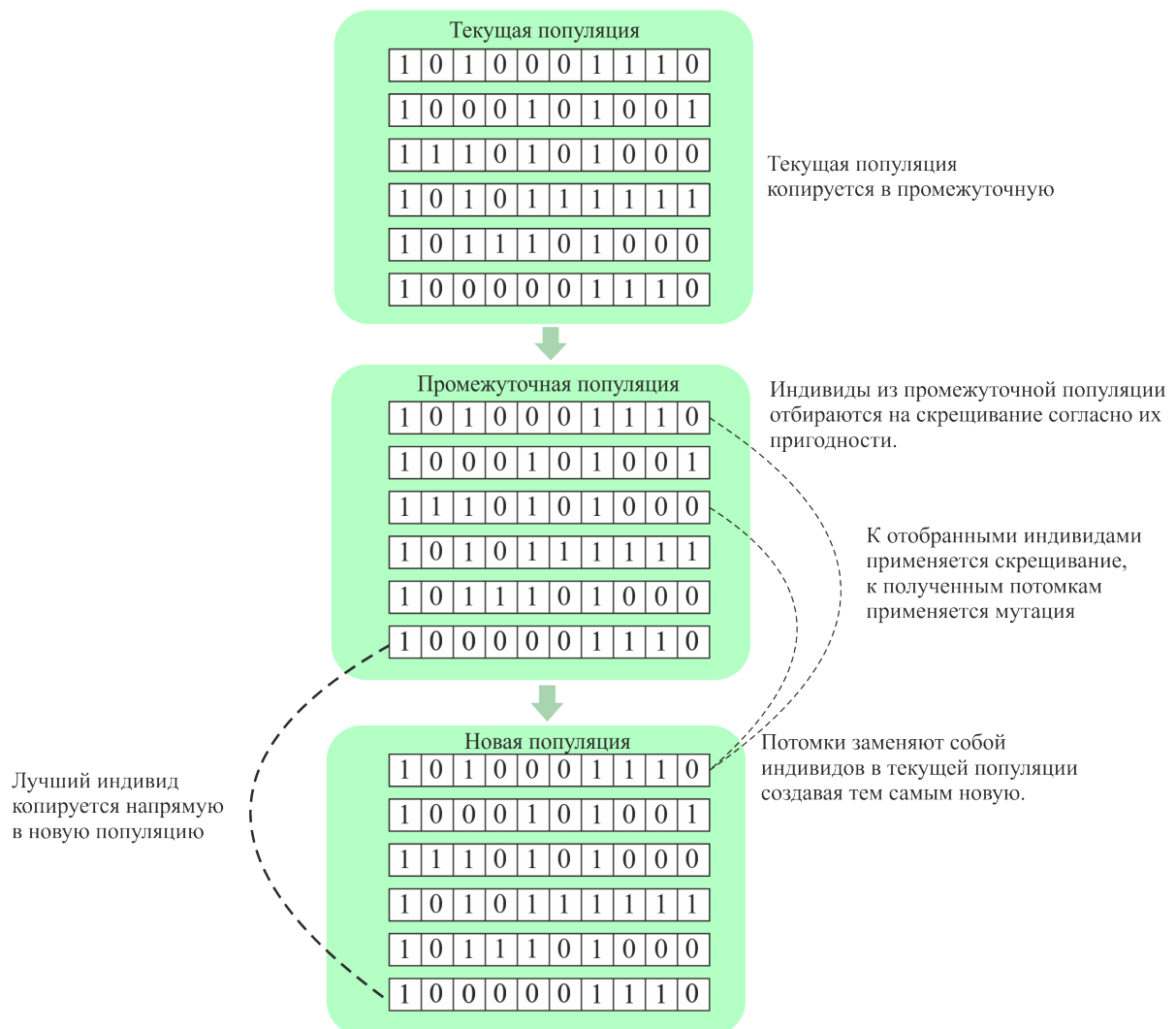


Рисунок 3.23 – Формирование новой популяции

Порядок работы с алгоритмом нахождения оптимальных значений характеристик двигателя и трактора при помощи однокритериального ГА следующий (представлен порядок работы с алгоритмом по определению оптимальных параметров стендовой характеристики по мощности двигателя).

1. Указываем области определения для всех переменных задачи оптимизации (0: n_x ; 1: n_{nom} ; 2: n_{min} ; 3: M_{nom} ; 4: M_k ; 5: k ; 6: vm).

2. Далее следует ввод параметров генетического алгоритма:

размер популяции означает, сколько индивидов будет в популяции, с помощью которой осуществляется поиск;

число поколений: рекомендуются значения от 100 до 1000;

тип мутации: 1 – низкая мутация, 2 – средняя мутация. 3 – высокая мутация;

число прогонов: количество запусков алгоритма с заданными выше параметрами.

Оптимальные значения целевой функции $N_e = f(M_k)$ в конце работы алгоритма имеют следующий вид:

ПОИСК ОПТИМАЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Прогон#1

Лучшая точка (2385,2200,1560,260,251,1.2,0.2),
значение функции 51.6601 найдена в 28 поколении.

Прогон#2

Лучшая точка (2385,2200,1560,260,251,1.2,0.2),
значение функции 51.6601 найдена в 48 поколении.

Прогон#3

Лучшая точка (2385,2200,1560,260,251,1.2,0.2),
значение функции 51.6601 найдена в 39 поколении.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МАШИННО-ТРАКТОРНЫХ АГРЕГАТОВ

4.1. Методика экспериментальных исследований МТА

Цель экспериментальных исследований – оценка достоверности методики расчета энергетических показателей МТА (проверка адекватности математических моделей МТА, представленных во втором разделе), а также определение исходных данных в виде статистических характеристик случайных процессов на ведущих колесах трактора и на коленчатом валу двигателя.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих основных задач:

определение закономерности изменения энергетических и технико-экономических параметров МТА при выполнении технологических операций;

обработка результатов эксперимента с целью получения данных для оценки эффективности теоретического метода установления влияния переменных внешних воздействий на выходные параметры МТА.

Объектами экспериментальных исследований выбраны различные машинно-тракторные агрегаты: для прокладки осушительных каналов, в состав которого входят трактор Т-170Б* [156] и экспериментальный плуг ПИГА, тяговый культиваторный агрегат ДТ-175С с КЧП-5.4, тяговый агрегат ДТ-75Н (с двигателем постоянной мощности) +БДТ-3.0 (данные по испытаниям последних двух МТА представлены в диссертации на соискание степени доктора технических наук Эвиева В.А.) [169].

Экспериментальные исследования проводились по следующей программе:

1. Стендовые испытания двигателя с целью снятия стендовой характеристики и определения основных энергетических параметров трактора.

2. Оснащение опытного МТА измерительным комплексом и тарировка датчиков [131].

3. Проведение лабораторно-полевых испытаний агрегата.

* Подготовлен в Северо-Западном филиале НАТИ Р.Х. Юсуповым, В.А. Уртаевым, Х.М. Олимовым.

4. Хронометраж работы МТА.

5. Обработка результатов испытаний и анализ полученных данных.

Стендовые исследования двигателя Д-160 трактора Т-170Б проводились в лаборатории испытания тракторов опытного завода ВНИИЗемМаш, на испытательном стенде СТ-81 по ГОСТ 18509–88. Стенд оснащен балансировочным динамометром DS-1036-4/N.

Цель исследований – снятие регуляторной и скоростной характеристик двигателя [60].

Лабораторно-полевые испытания проводились на испытательном полигоне Дружносельского лесничества Ленинградской области в 1991–1992 годах. При проведении испытаний руководствовались требованиями, предусмотренными в стандартах (ГОСТ–20915–75, ГОСТ 7057–87, ГОСТ 18509–88), типовой операционной технологии механизированных полевых работ [155]. Схема проведения опытов приведена на рисунке 4.1.



Рисунок 4.1 – Схема проведения опытов при лабораторно-полевых испытаниях МТА

Перед началом испытаний и после их завершения производилась проверка тензометрической аппаратуры, проверялась балансировка мостов в каналах усилителя и работа осциллографа. Перед началом опыта проводился контрольный проход с проверкой работы

измерительно-регистрирующей аппаратуры. Каждый опыт проводится с трехкратной повторностью в следующей последовательности:

установление требуемых тепловых режимов в тракторе;

выбор режима работы и настройка агрегата;

прогрев и проверка работы измерительно-регистрирующей аппаратуры;

балансировка мостов в каналах усилителя и запись нулевых линий;

регистрация процессов на неустановившемся режиме работы МТА;

остановка и запись нулевых линий;

регистрация в журнале наблюдений соответствующей информации о проведении опыта.

На рисунке 4.2 показаны показатели агрегата, регистрируемые в ходе экспериментов.

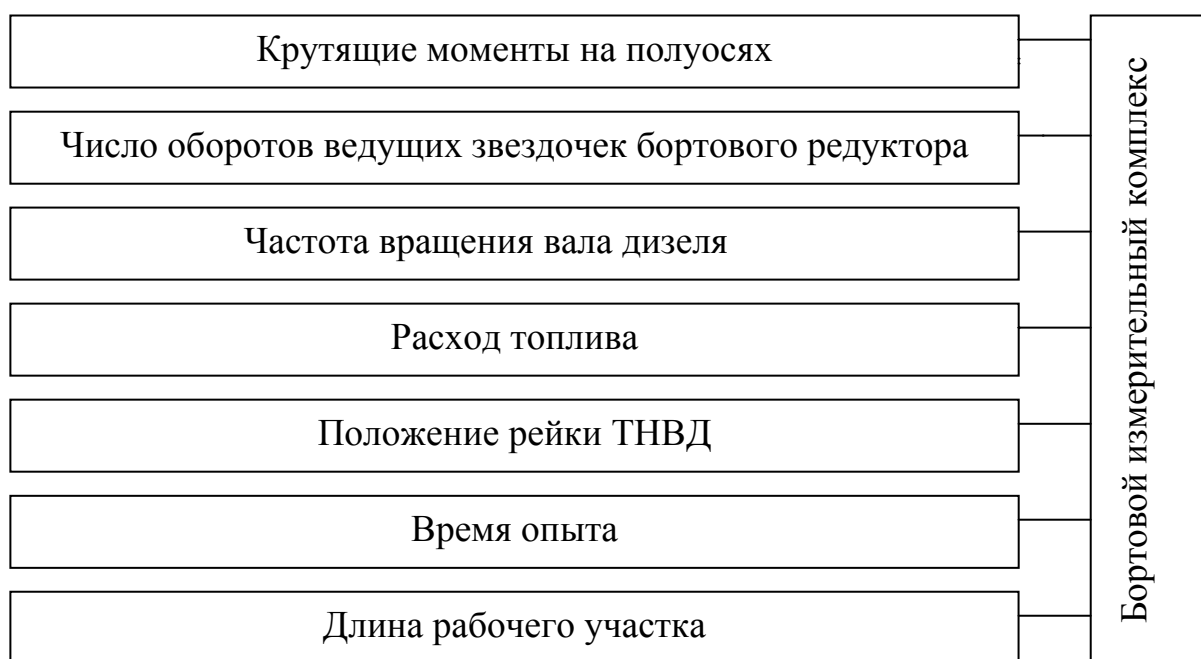


Рисунок 4.2 – Показатели, регистрируемые во время проведения лабораторно-полевых испытаний

Измерение основных энергетических показателей МТА осуществлялось с помощью измерительной, регистрирующей и усилительной аппаратуры.

4.2. Методика экспериментальных исследований агрегатов на базе тракторов ДТ-75Н и ДТ-175С

Целью экспериментальных исследований являлась проверка теоретических предпосылок по определению средних значений энергетических и технико-экономических параметров агрегатов на базе тракторов ДТ-75Н и ДТ-175С.

В задачи экспериментальных исследований входило следующее:

1. Установление вероятностно-статистических закономерностей изменения основных энергетических показателей тракторов класса 3 при гармонической нагрузке.

2. Экспериментальная проверка расчетных значений эксплуатационных допусков на энергетические параметры тракторов класса 3 при гармонической нагрузке.

3. Определение закономерности изменения энергетических и технико-экономических параметров тяговых и тягово-приводных агрегатов при выполнении ими полевых механизированных работ в условиях Ленинградской области.

4. Определение экстремальных значений энергетических и технико-экономических параметров тяговых и тягово-приводных агрегатов и соответствующих им оптимальных нагрузочных режимов дизельных энергоустановок тракторов класса 3.

5. Установление экстремальных значений коэффициентов реализации энергетических и технико-экономических параметров дизельных энергоустановок.

6. Экспериментальная проверка допускаемых значений параметров, предназначенных для непрерывного контроля эффективности функционирования машинно-тракторных агрегатов.

Программа экспериментальных исследований предусматривала следующие мероприятия:

оснащение экспериментальной установки измерительной аппаратурой и маркировка тензометрических узлов [46];

лабораторные исследования дизельных энергоустановок;

лабораторно-полевые испытания тяговых и тягово-приводных агрегатов на базе тракторов ДТ-75Н, ДТ-75М и ДТ-175С.

Объектами исследований являлись:

тяговые агрегаты ДТ-75Н+БДТ-3Д, Т-150К+КЧП-5А, ДТ-75Н+КЧП-5,4, ДТ-175С+КЧП-5,4*;

тягово-приводные агрегаты Т-150К+ВПК-4,5, ДТ-75Н+ВПК-4,5, ДТ-1750ВПК-4,5*.

Стендовые испытания проводились в тракторной лаборатории Северо-Западной МИС на тормозном стенде САК-Н 670 с целью снятия регуляторной и скоростной характеристик дизельных энергоустановок тракторов класса 3. Данные испытания проводились до и после лабораторно-полевых испытаний по стандартной методике (ГОСТ 18509–86).

Полевые испытания тяговых и тягово-приводных агрегатов с тракторами Т-150К, ДТ-75Н и ДТ-175С проводились на полях опытного хозяйства Северо-Западной МИС по ГОСТ 7057–81 в соответствии с типовой технологией и правилами производства механизированных полевых работ [56]. Были исследованы различные скоростные и нагрузочные режимы работы двигателей СМД-62, СМД-18НП, СУ трактора ДТ-175С, которые достигались изменением тягового сопротивления агрегатов за счет различного заглубления рабочих органов сельскохозяйственных машин.

Целью полевых испытаний являлось установление степени изменения выходных энергетических и технико-экономических параметров МТА при случайном характере изменения тягового сопротивления в полевых условиях.

С целью измерения основных энергетических и технико-экономических параметров тяговых и тягово-приводных МТА они были оснащены измерительной, усилительной и регистрирующей аппаратурой. Программой экспериментальных исследований агрегатов предусматривалось измерение следующих параметров:

- крутящих моментов на ведущих полуосях трактора;
- числа оборотов ведущих колес трактора;
- часового расхода топлива;
- тягового усилия трактора;
- времени опыта;
- числа оборотов ВОМа;
- крутящего момента на ВОМе;
- крутящего момента на валу двигателя;
- число оборотов вала двигателя.

Схема определяемых параметров агрегатов приведена на рисунке 4.3.

* Использованы материалы из диссертации В.А. Эвиева на соискание степени доктора технических наук.

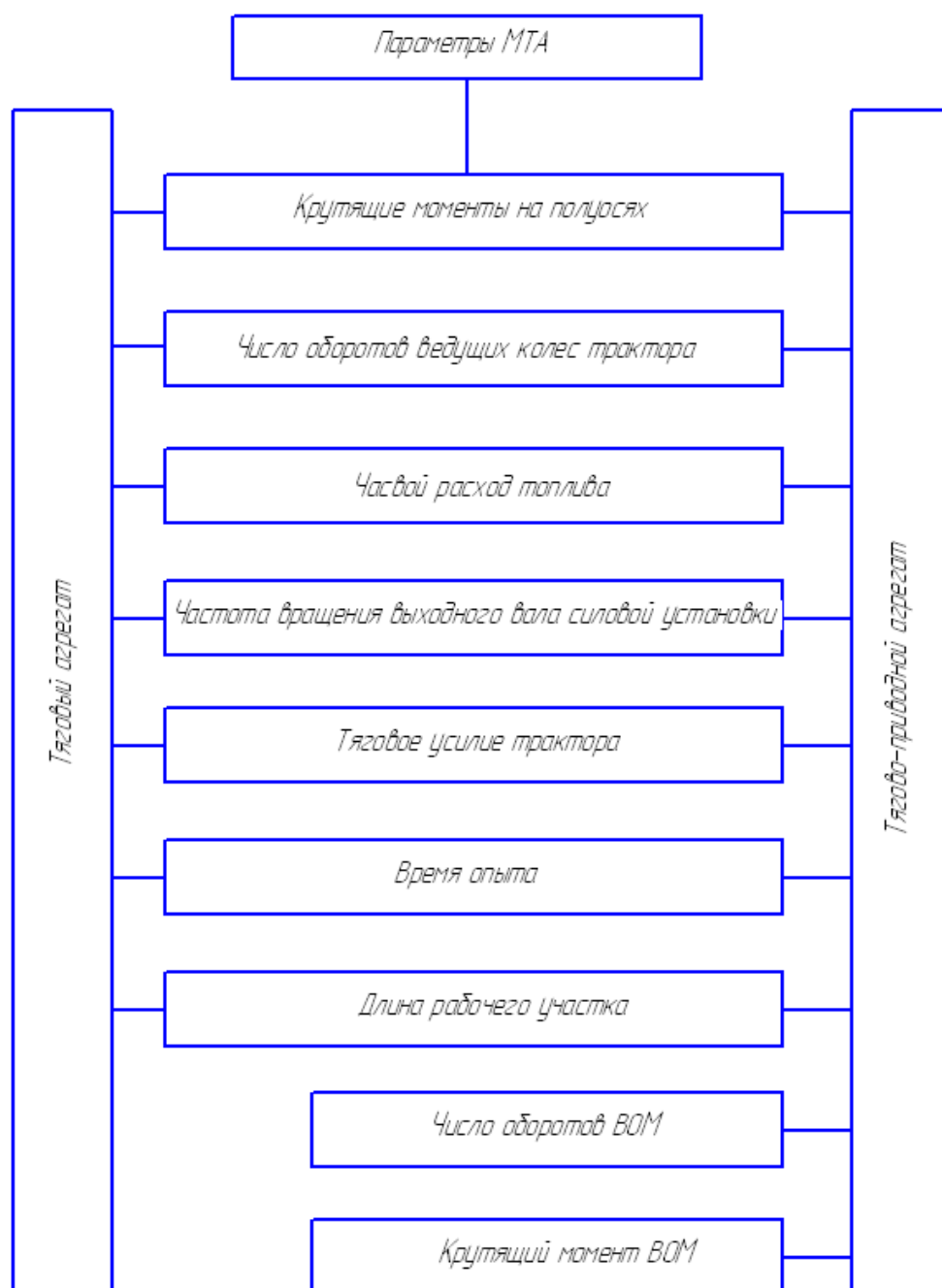


Рисунок 4.3 – Параметры, регистрируемые при лабораторно-полевых испытаниях МТА

Лабораторно-полевые испытания проводились в соответствии с требованиями, предусмотренными в стандартах (ГОСТ 18508-88, ГОСТ 18509-88, ГОСТ 7057-88 и ГОСТ 20915-75), и с типовой операционной технологией и правилами производства механизированных полевых работ [56].

Условия проведения лабораторно-полевых испытаний (метеоусловия, характеристика поля и почвы) соответствовали требованиям ГОСТ 20915-75.

Тяговые агрегаты испытывались на средних и легких суглинках с удельным сопротивлением $K_0 = 40\text{--}60$ кПа и влажностью 15–25% на глубине до 25 см при слабой каменистости почвы.

Для испытания тягово-приводных агрегатов были использованы поля со слабой и средней каменистостью, с количеством камней 5–20 и 20–50 м³/га соответственно. Средний диаметр камней – 0,07–0,3 м. Преобладали валуны, состоящие из гранитовых гнейсов, из осадочных пород – известняки и доломиты, а также песчаники и изредка сланцы.

Схема проведения лабораторно-полевых испытаний тягового и тягово-приводного агрегатов с трактором ДТ-175С показана на рисунке 4.4.

Продолжительность опыта и длина участка поля устанавливались с учетом получения представительных выборок, определения законов распределения и числовых характеристик исследуемых величин.

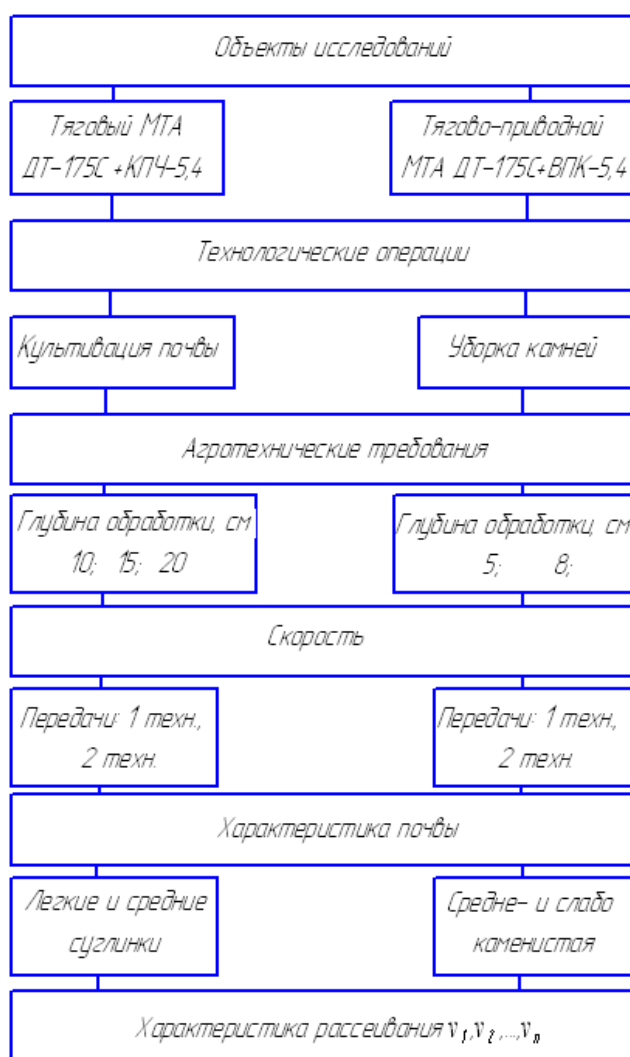


Рисунок 4.4 – Схема лабораторно-полевых исследований тягового и тягово-приводного агрегатов

4.3. Анализ результатов экспериментальных исследований

4.3.1. Вероятностно-статический анализ внешних воздействий на МТА, в состав которого входит трактор Т-170 Б

В результате анализа было выявлено, что колебания низкочастотных составляющих внешних воздействий подчиняются нормальному закону, выходные параметры также изменяются по нормальному закону (рисунки 4,5–4,8). Вероятность согласия опытных и теоретических распределений по критерию Пирсона $P(\chi^2)$ в зависимости от скорости движения находилась для крутящего момента в пределах 0,25–0,6, для частоты вращения вала дизеля в пределах 0,32–0,12 уменьшение значения критерия для частоты вращения объясняется тем, что с увеличением нагрузки нормальное распределение частоты вращения вала дизеля, как случайной величины, имеет большую асимметрию по сравнению с меньшими значениями нагрузки двигателя [1].

В процессе обработки экспериментальных данных установлены вероятностно-статистические оценки: математические ожидания, дисперсии, средние квадратические отклонения, коэффициенты вариации (таблица 4.1). В качестве входной величины рассматривается крутящий момент M_K на ведущих колесах.

Таблица 4.1 – Вероятностно-статические оценки показателей работы тягового агрегата Т-170Б+ПИГА

Номер передачи	ϑ_p , м/с	G_T , кг/ч	\bar{M}_K , н·м	$\sigma_{\bar{M}_K}$, н·м	$\nu_{\bar{M}_K}$, %	\bar{n}_D , с ⁻¹	$\sigma_{\bar{n}_D}$, с ⁻¹	$\nu_{\bar{n}_D}$, %
I	0,710	20,30	6925,5	3222,1	-	127,00	14,10	0,110
	0,740	20,50	7569,0	2523,7	0,33	127,60	6,03	0,050
	0,710	17,20	6194,0	1731,2	0,28	130,10	7,70	0,060
	0,730	19,10	7029,5	2448,7	0,35	130,50	5,90	0,045
III	0,990	23,40	6594,5	2060,1	0,31	127,85	5,90	0,046
	0,994	17,62	6308,0	2112,0	0,33	127,30	6,34	0,050
	0,824	17,20	7562,0	4072,3	-	107,46	39,60	-
	0,986	23,56	7175,5	2073,5	0,29	125,70	14,70	0,120

Из таблицы 4.1 видно, что нагрузка при работе на I и на III передачах в среднем одинаковая и составляет 6929 н·м и 6693 н·м соот-

ветственно. Коэффициент вариации крутящего момента на ведущих колесах в среднем для I и III передач находим в пределах 0,32–0,31.

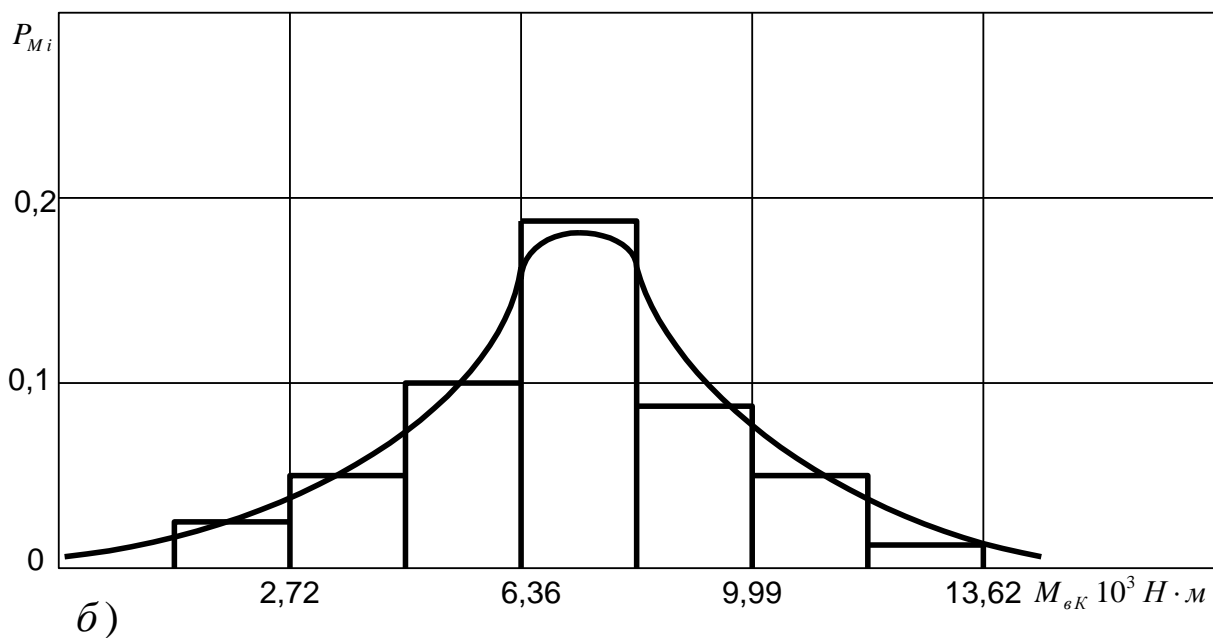
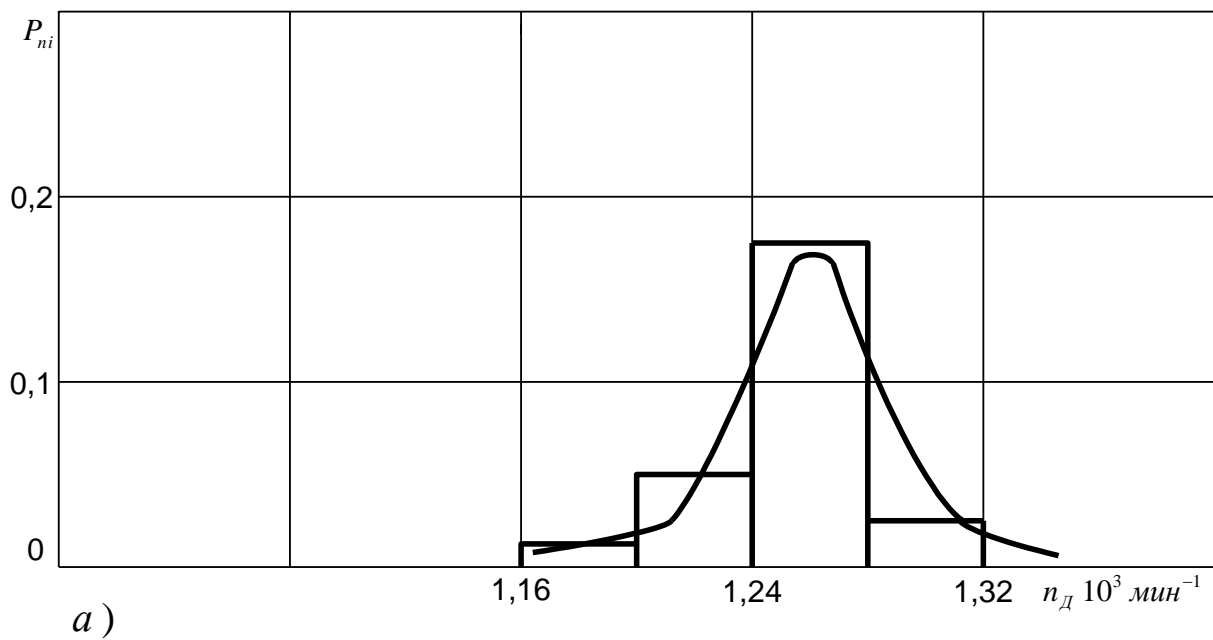


Рисунок 4.5 – Гистограммы частоты вращения: а – коленчатого вала; б – крутящего момента, на ведущем колесе трактора Т-170Б при работе с плугом ПИГА; I передача, $V = 0,73 \text{ м/с}$

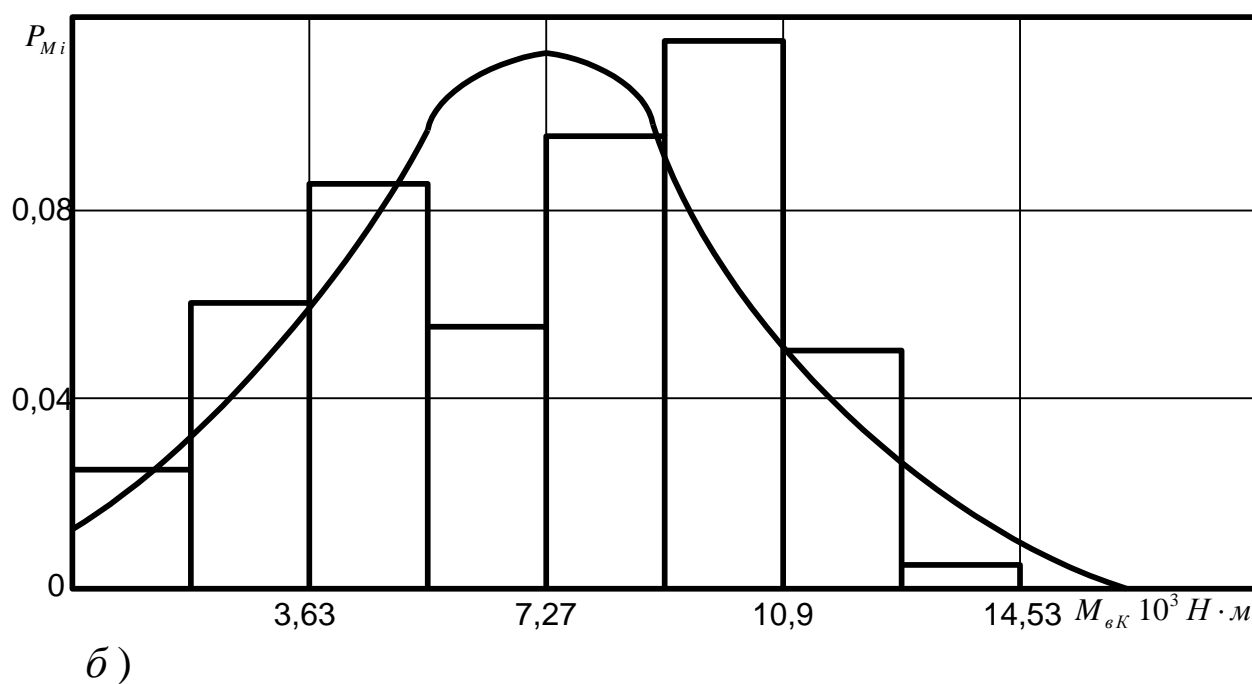
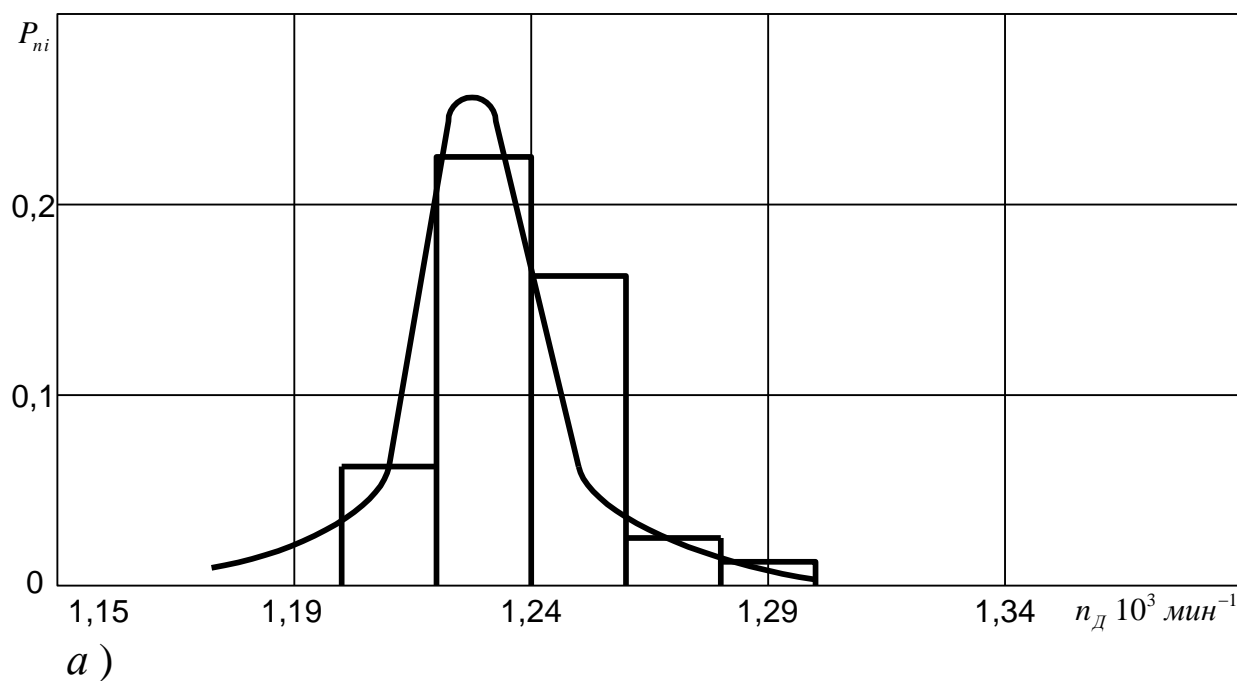


Рисунок 4.6 – Гистограммы частоты вращения: а – коленчатого вала;
б – крутящего момента, на ведущем колесе трактора Т-170Б при работе с плу-
гом ПИГА; I передача, $V = 0,71 \text{ м/с}$

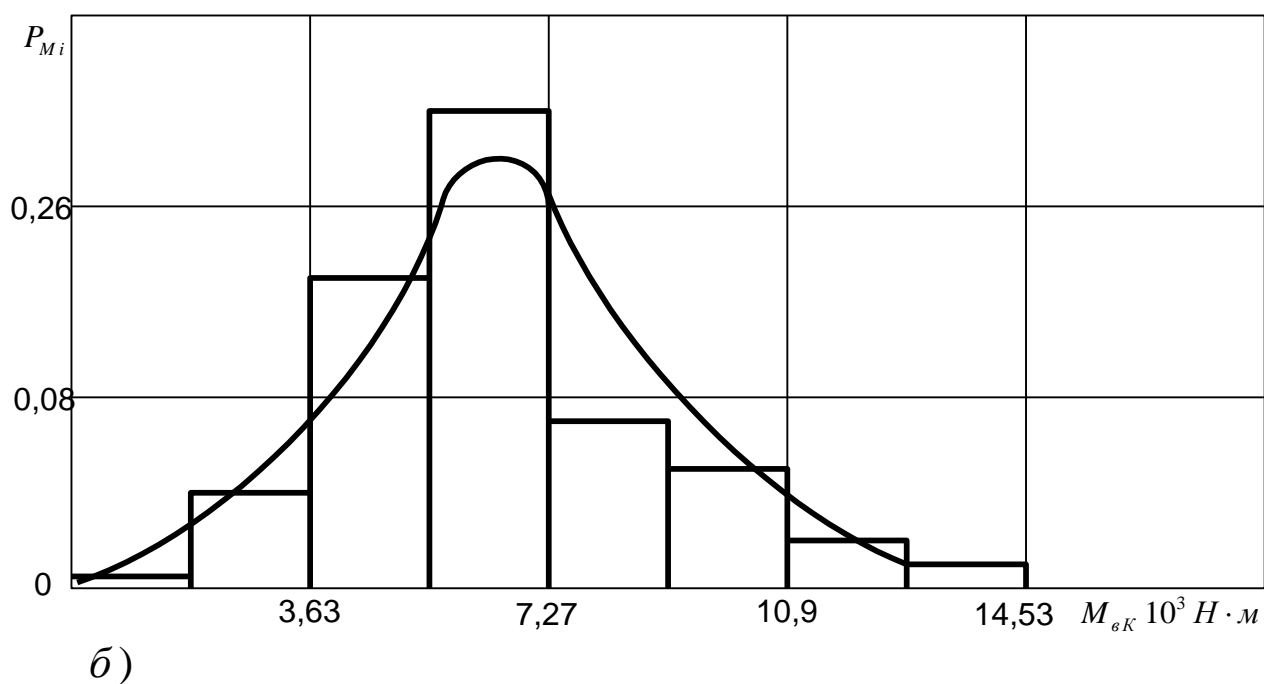
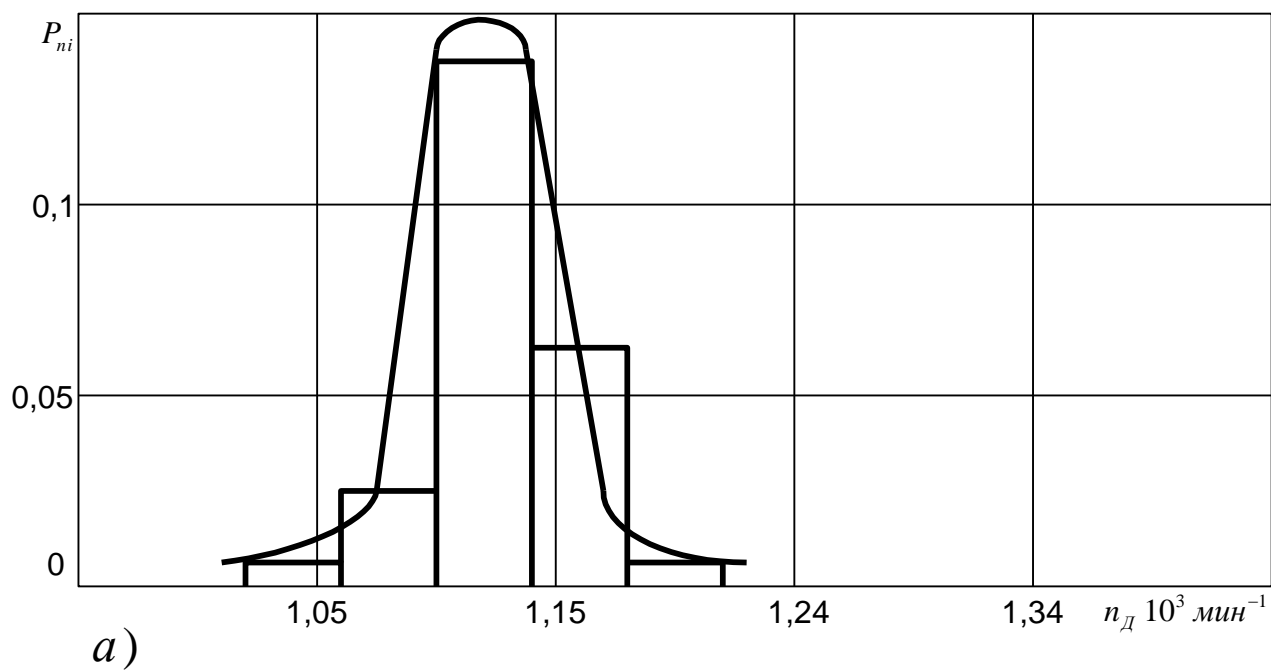


Рисунок 4.7 – Гистограммы частоты вращения: а – коленчатого вала;
 б – крутящего момента, на ведущем колесе трактора Т-170Б при работе
 с плугом ПИГА; III передача, $V = 0,994 \text{ м/с}$

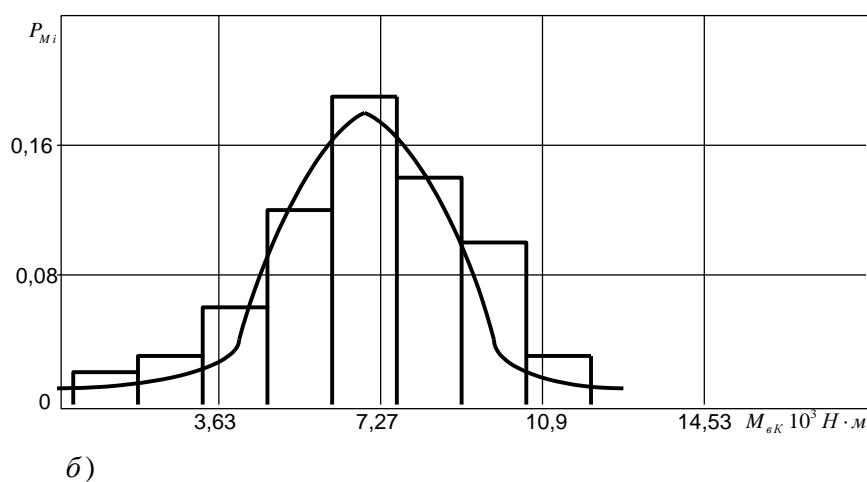
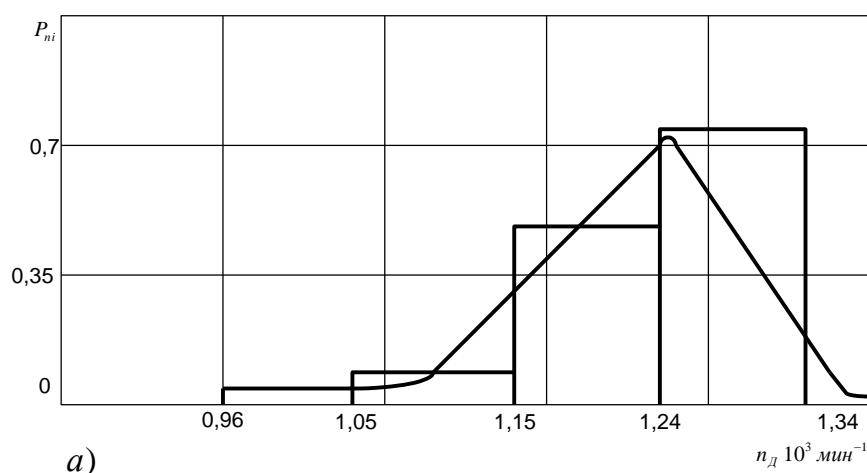


Рисунок 4.8 – Гистограммы частоты вращения: а – коленчатого вала; б – крутящего момента, на ведущем колесе трактора Т-170Б при работе с плугом ПИГА; III передача, $V = 0,99 \text{ м/с}$

Средние значения частоты вращения вала дизеля составили для I передачи $128,8 \text{ с}^{-1}$, для III передачи $126,9 \text{ с}^{-1}$. Коэффициент вариации частоты вращения вала дизеля для I и III передач находится в пределах 0,066–0,073.

Анализируя средние значения крутящего момента $M_{\text{вк}}$ и частоты вращения n_d , а также их коэффициенты вариации для различных реализаций на I передаче, можно отметить, что при некотором увеличении скорости движения (0,71–0,74 м/с) нагрузка также увеличилась $M_{\text{вк}} = 6559\text{--}7299 \text{ нм}$. Значения коэффициента вариации находятся в пределах 0,28–0,35. Средние значения частоты вращения n_d для I передачи находятся в пределах 127,0–130,5 и расположены в области номинальной точки на корректорной ветви стендовой характери-

ки. Значение коэффициента вариации частоты вращения n_d находятся в пределах 0,110–0,045.

Анализируя средние значения $M_{в.к}$ и n_d , а также их коэффициенты вариации для различных реализаций на III передаче, можно отметить, что при увеличении скорости движения в пределах 0,824–0,994 момент на ведущих колесах $M_{в.к} = 7562–6308$ нм, $V_{M_{в.к.}} = 0,29–0,33$. Средние значения частоты вращения вала дизеля n_d находятся на корректорной ветви характеристики и составляют 107,46–125,85 c^{-1} . Значение коэффициента вариации n_d находятся в пределах $v_{n_d} = 0,12–0,05$.

Исходя из проведенного анализа статистических характеристик (таблица 4.1), можно сделать следующий вывод: с увеличением номера передачи и уменьшением передаточного числа трансмиссии нагрузка на двигатель увеличивается, при этом средние значения частоты вращения вала дизеля и крутящего момента на III передачи по сравнению с I передачей несколько смещаются по корректорной ветви в сторону $M_{тах}$, коэффициент вариации n_d увеличивается, что должно повлиять на энергетические показатели МТА. Расход топлива заметно увеличивается на III передаче по сравнению с I передачей (таблица 4.1).

4.3.2. Корреляционно-спектральный анализ параметров работы МТА с трактором Т-170Б

В результате обработки осциллограмм процессов на ведущих колесах и коленчатом валу получены корреляционные функции и спектральные плотности. Данные характеристики позволяют получить наиболее полную картину протекания динамических процессов во временной и частотной областях. При аппроксимации корреляционных функций были установлены значения коэффициентов α и β (таблица 4.2), которые характеризуют интенсивность затухания корреляционной функции и среднюю частоту периодических составляющих рассматриваемых случайных процессов. Нормированные корреляционные функции и спектральные плотности крутящего момента $M_{в.к}$ и частоты вращения вала дизеля n_d представлены на рисунках 4.9, 4.10.

Таблица 4.2 – Значения коэффициентов α и β и времени корреляционной связи τ

Номер передачи	$\alpha_{n_{дсп}}$	$\beta_{n_{дсп}}$	$\alpha_{M_{в.к.сп}}$	$\beta_{M_{в.к.сп}}$	$\tau_{n_{дсп}}$	$\tau_{M_{в.к.сп}}$
I	4,16	5,30	0,31	0	0,67	7,75
III	2,22	1,64	0,84	0,98	1,79	2,54

Анализируя рисунки 4.9, 4.10 и данные таблицы 4.2, необходимо отметить, что колебания измеряемых параметров являются низкочастотными, максимумы энергетических спектров для частоты вращения $n_{д}$ и крутящего момента $M_{в.к}$ на I передаче расположены в диапазоне частот от 0 до 4 с^{-1} и от 0 до 1 с^{-1} соответственно. Время спада корреляционных функций для $n_{д}$ и $M_{в.к}$ составило в среднем 0,67 и 7,75 с соответственно. В основном, влияние периодических составляющих на корреляционной функции отсутствует. Коэффициенты α и β равны в среднем $4,16 \text{ с}^{-1}$ и $5,3 \text{ с}^{-1}$ для частоты вращения вала двигателя, $0,31 \text{ с}^{-1}$ и 0 для крутящего момента.

На III передаче максимумы спектральных плотностей процессов $n_{д}(t)$ и $M_{в.к}(t)$ расположены в диапазоне частот от 0 до 3 с^{-1} , от 0 до 2 с^{-1} соответственно. Время спада корреляционных функций для $n_{д}$ и $M_{в.к}$ составили в среднем 1,79 с и 2,54 с соответственно. Коэффициенты α и β равны в среднем 2,22 и $1,64 \text{ с}^{-1}$ для $n_{д}$, 0,84 и $0,98 \text{ с}^{-1}$ для $M_{в.к}$. На III передаче заметно наличие периодических составляющих с большим периодом колебаний. Высокочастотный колебательный характер некоторых кривых $P(\tau)$ на I и III передачах генерируется на участке взаимодействия зубцов ведущего колеса с гусеничными зацеплениями.

В целом корреляционно-спектральный анализ показал, что протекание случайных процессов на ведущем колесе и на валу двигателя трактора Т-170Б является аналогичным для большинства мобильных сельскохозяйственных агрегатов. При этом, если для крутящего момента на ведущем колесе с увеличением скорости движения время корреляции заметно уменьшается и процесс $M_{в.к}(t)$ становится более динамичным, то для частоты вращения вала дизеля с повышением номера передачи время корреляции возросло, спектр колебаний стал более узким. Возможно, это объясняется тем, что данный трактор обладает большой массой и, следовательно, большой инерционностью, которая при сравнительно небольших скоростях движение агрегата влияет на движение динамичности процесса на коленчатом валу [84].

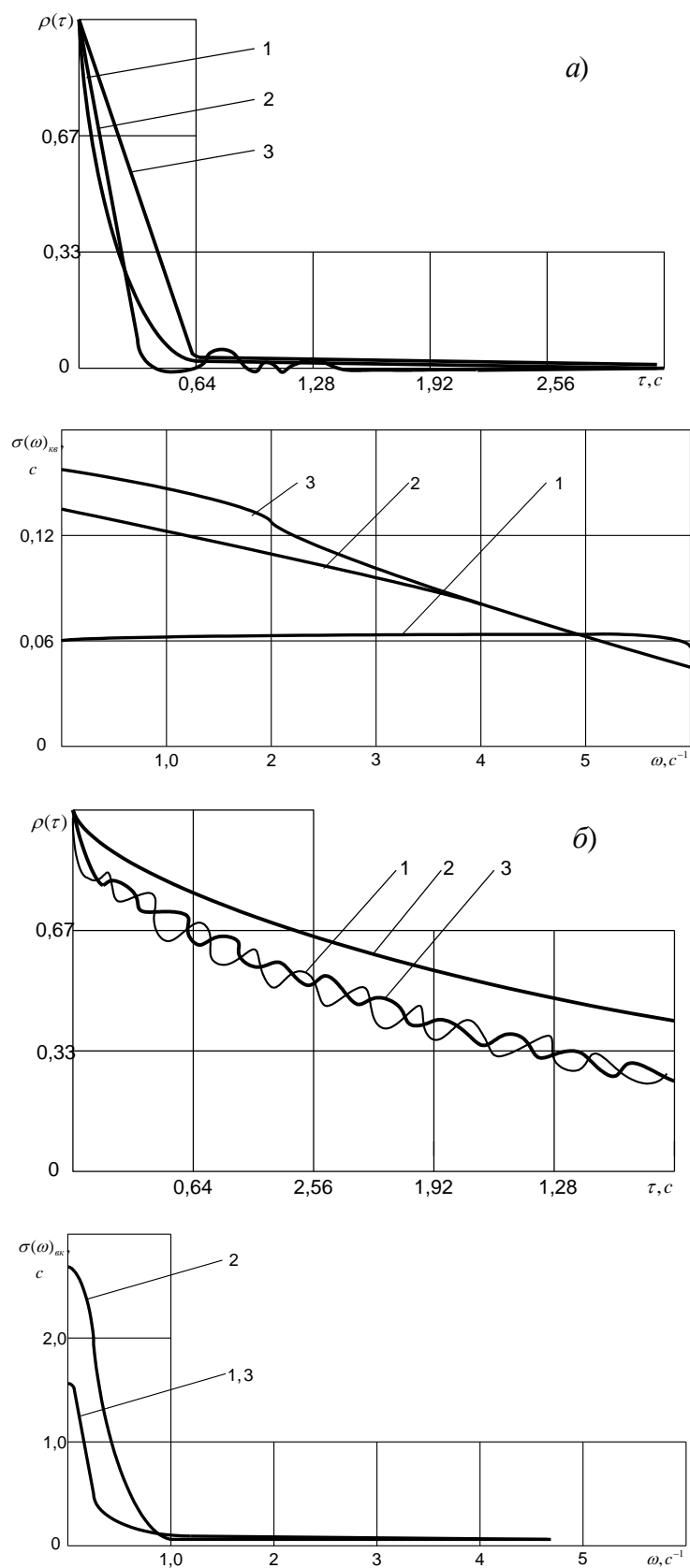


Рисунок 4.9 – Автокорреляционные функции и спектральные плотности:
а – частоты вращения вала двигателя; б – крутящего момента на ведущем колесе трактора Т-170Б, при работе с плугом ПИГА; I передача : 1 – $V = 0,73 \text{ м/с}$;
2 – $V = 0,74 \text{ м/с}$; 3 – $V = 0,71 \text{ м/с}$

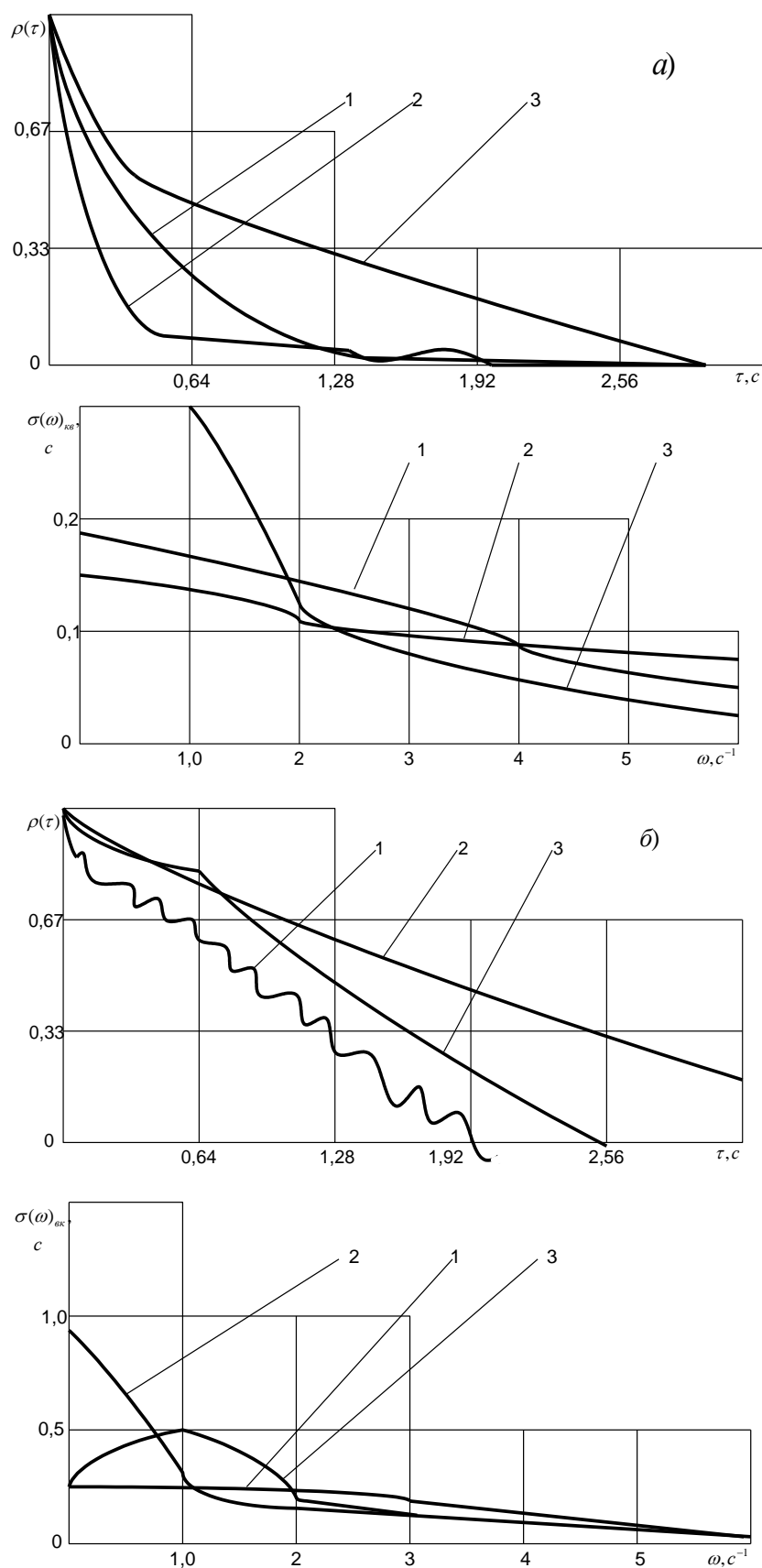


Рисунок 4.10 – Автокорреляционные функции и спектральные плотности:
а – частоты вращения вала двигателя; б – крутящего момента на ведущем колесе трактора Т-170Б, при работе плугом ПИГА; III передача: 1 – $V = 0,986$ м/с;
2 – $V = 0,99$ м/с; 3 – $V = 0,994$ м/с

4.4. Вероятностно-статистический анализ входных внешних воздействий при работе машинно-тракторных агрегатов на базе тракторов ДТ-75Н, ДТ-75М и ДТ-175С

В процессе обработки экспериментальных данных устанавливались законы распределения входных и выходных параметров и показателей работы машинно-тракторных агрегатов и их вероятностно-статистические оценки: математические ожидания, средние квадратические отклонения, дисперсии, коэффициенты вариации и степени неравномерности, а также корреляционные функции, спектральные плотности и характеристики выбросов.

Обработка опытных данных с целью определения законов распределения внешних воздействий и выходных параметров агрегатов и их количественных характеристик осуществлялась в следующей последовательности:

устанавливались максимальные и минимальные значения рассматриваемой величины, число интервалов;

определялись эмпирические частоты в каждом интервале и строился график частот в зависимости от числа классов;

вычислялись эмпирические значения параметров распределения – математическое ожидание, среднее квадратическое отклонение и другие оценки;

устанавливался теоретический закон распределения частот исследуемой величины и производилось выравнивание эмпирических частот по принятой теоретической кривой;

оценивалось соответствие эмпирических и теоретических частот по критерию согласия χ^2 Пирсона [106, 114];

находился дифференциальный закон, имеющий наибольшую вероятность согласия χ^2 , т.е. дающий наилучшее согласование эмпирических и теоретических частот.

При анализе опытных данных, полученных в процессе испытаний бороновальных, культиваторных, камнеуборочных агрегатов, было установлено, что эмпирические распределения внешних воздействий (тягового сопротивления агрегата, момента сопротивления на валу двигателя и выходном валу силовой установки, тягового момента сопротивления, момента сопротивления на валу отбора мощности, глубины обработки почвы, ширины захвата и других показателей)

хорошо согласуются с теоретическим законом. Вероятность согласия $P(x^2)$ находилась в пределах от 0,26 до 0,80 для тяговых агрегатов и от 0,24 до 0,74 для тягово-приводных. В качестве теоретического закона распределения частот был использован нормальный закон.

4.4.1. Определение вероятностно-статистических характеристик входных воздействий при работе тяговых агрегатов

а) Тяговый культиваторный агрегат ДТ-175С (ГМТ) + КЧП-5,4

Законы распределения вероятностей момента сопротивления $\varphi(M_T)$ на ведущих полуосях трактора при работе культиваторного агрегата ДТ-175С + КЧП-5,4 (заданная глубина обработки $h = 20$ см) в диапазоне рабочих скоростей от 2,14 до 2,68 м/с представлена на рисунке 4.7, а. Здесь и в дальнейшем в качестве теоретического закона, аппроксимирующего эмпирическое распределение, использован закон Гаусса [47]. При построении графиков плотностей распределения использована зависимость

$$\varphi(M_T) = \sigma_{M_T}^{-1} \varphi(t),$$

где $\varphi(t) = (2\pi)^{-1} \exp(-0,5t^2)$;

σ_{M_T} – среднеквадратическое отклонение момента M_T , установленное экспериментально;

$t = (M_T - \overline{M}_T) \sigma_{M_T}^{-1}$ – аргумент функции Лапласа ($t=0,1,2,3$);

\overline{M}_T – среднее значение величины M_T , установленное экспериментально.

Степень соответствия эмпирического и теоретического нормального распределений оценивается по критерию x^2 . В интервале рабочих скоростей движения агрегата от 2,4 до 2,68 м/с вероятность согласия $P(x^2)$ находится в пределах 0,38–0,76.

Вероятностно-статистические оценки момента сопротивления на ведущих полуосях трактора на различных скоростях движения агрегата представлены в таблице 4.3. Графики зависимостей вероятностно-статистических характеристик величины M_T от рабочей скорости V_p даны на рисунке 4.11, б.

Таблица 4.3 – Вероятностно-статистические оценки момента сопротивления на ведущих полуосях трактора при работе агрегата ДТ-175С + КЧП-5,4

Передача	\bar{V}_P , м/с	\bar{M}_T , кН·м	σ_{M_T} , кН·м	$D(M_T)$, кН·м ²	V_{M_T} , %
I техн	2,14	13,02	1,57	2,48	12,10
II техн	2,38	14,93	1,88	3,54	12,59
I	2,68	16,89	2,23	4,97	13,20

С повышением рабочей скорости культиваторного агрегата происходит изменение центра распределения (среднего значения) и характеристик рассеяния момента сопротивления на ведущих полуосях. В диапазоне скоростей движения агрегата от 2,14 до 2,68 м/с среднее значение момента сопротивления увеличилось от 13,02 до 16,89 кНм, а среднее квадратическое отклонение изменилось от 1,57 до 2,23 кНм. Коэффициент вариации момента сопротивления на ведущих полуосях трактора ДТ-175 С в указанном диапазоне рабочих скоростей находится в пределах 12–13 %.

Интерполяция зависимости вероятностно-статистических оценок момента сопротивления на ведущих полуосях трактора от скорости движения \bar{V}_P проводилась многочленом по форме Лагранжа [106] и представлена в таблице 4.4.

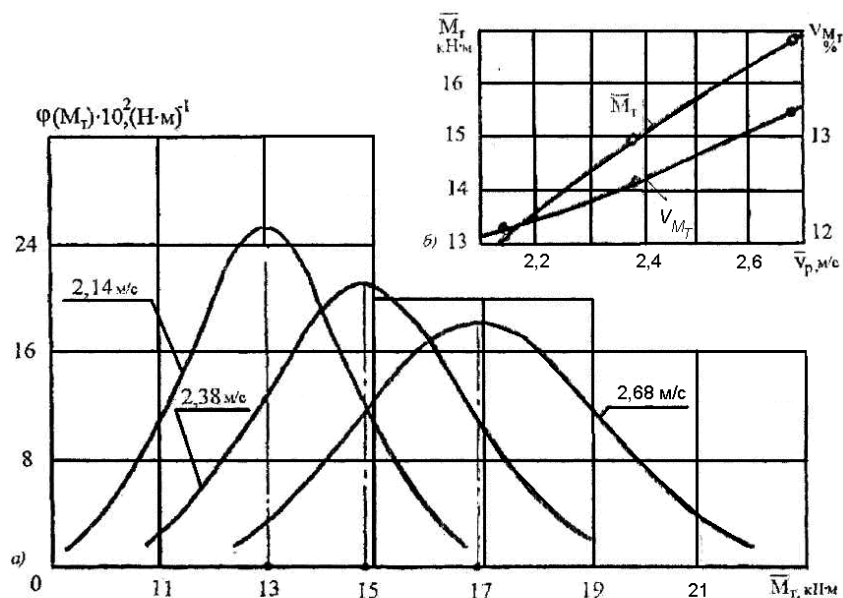


Рисунок 4.11 – Плотности распределения моментов сопротивления (а, в) при работе агрегата ДТ-175С + КЧП-5,4 и зависимости оценок распределения (б, г) от скорости движения: а, б – на ведущих полуосях; в, г – на выходном валу СУ

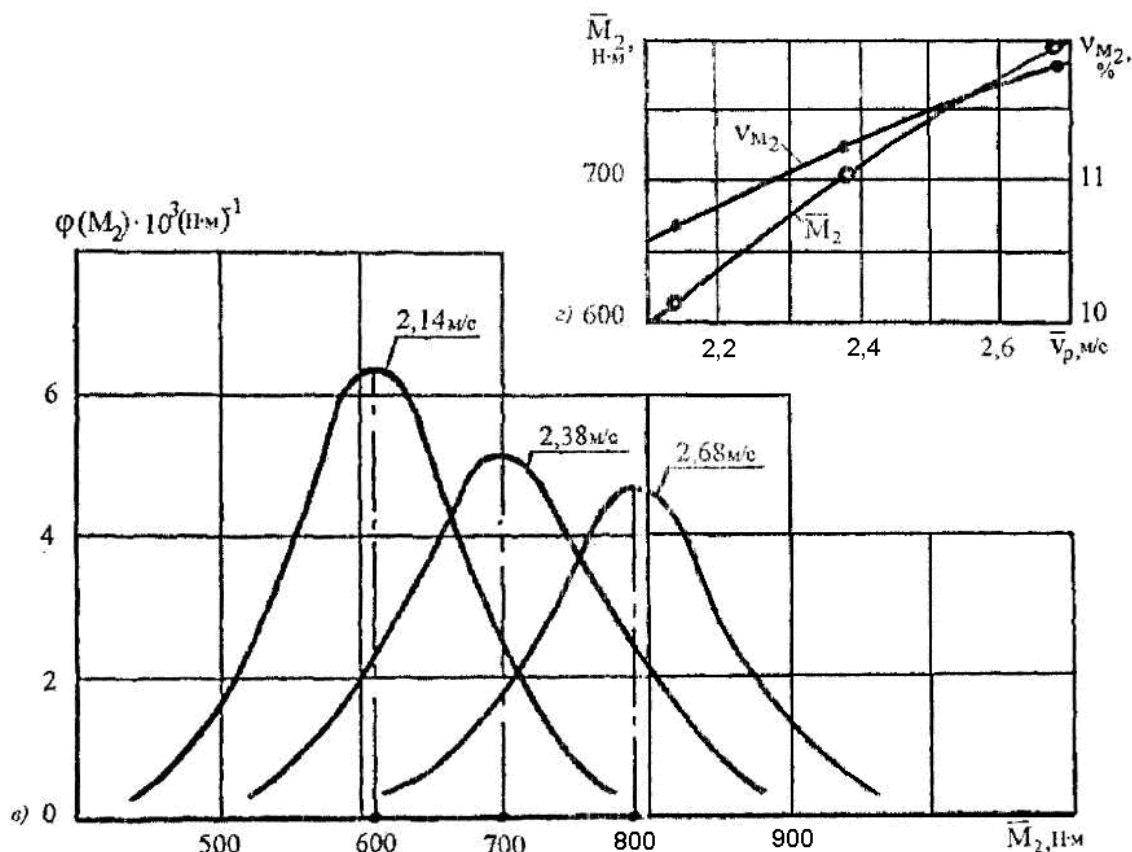


Рисунок 4.11 – Окончание

Таблица 4.4. – Эмпирические зависимости вероятностно-статистических оценок момента сопротивления на ведущих полуосях трактора от скорости движения агрегата ДТ-175С +КЧП-5,4 ($2,14 \leq V_p \leq 2,68$ м/с)

Параметр	Оценка	Расчетная формула
M_T	\bar{M}_T , кН·м	$-2,702 \bar{V}_p^2 + 20,193 \bar{V}_p - 17,821$
	σ_{M_T} , кН·м	$-0,213 \bar{V}_p^2 + 2,238 \bar{V}_p - 2,238$
	V_{M_T} , %	$-0,15 \bar{V}_p^2 + 2,780 \bar{V}_p + 6,856$

Законы распределения момента сопротивления $\varphi(M_2)$ на выходном валу СУ при работе культиваторного агрегата ДТ-175С + КЧП-5,4 в диапазоне рабочих скоростей от 2,14 до 2,68 м/с показаны на рисунке 4.11, в. Вероятность согласия эмпирического распределения с нормальным законом находилась в пределах $0,50 \leq P(X_2) \leq 0,81$; экспериментально установлено, что с увеличением скорости движения вероятность согласия снижается.

Вероятностно-статистические оценки момента сопротивления M_c на выходном валу СУ и тягового сопротивления R_a культиваторного агрегата ДТ-175С + КЧП-5,4 представлена в таблице 4.5. Графические зависимости оценок величины M_c от скорости движения агрегата показаны на рисунке 4.11, з.

Таблица 4.5 – Вероятностно-статистические оценки входных показателей при работе агрегата ДТ-175С+ КЧП-5,4

Глубина обработки h , см	\bar{V}_p , м/с	\bar{R}_a , кН	σ_{Ra} , кН	v_{Ra} , %	\bar{M}_c , Н·м	σ_{Mc} , Н·м	v_{Mc} , %
10	2,42	15,3	2,00	13,1	527	65,3	11,5
	2,45	16,0	2,35	14,7	688	94,9	12,8
15	2,22	19,6	2,25	11,5	565	63,8	11,3
	2,86	20,5	2,52	12,3	734	86,6	12,3
20	2,14	23,7	2,56	10,8	612	61,8	10,7
	2,38	24,4	2,71	11,1	702	78,6	11,2
	2,68	25,4	2,89	11,4	794	84,2	11,9

При увеличении глубины обработки h от 10 до 20 см наблюдается повышение тягового сопротивления агрегата при работе на I и II технологических передачах в среднем на 36%. При этом момент сопротивления на выходном валу силовой установки увеличивается в среднем на 16%. Наблюдается уменьшение коэффициентов вариации указанных показателей в среднем на 20% и 8% соответственно.

Скорость движения оказывает существенное влияние на параметры распределения момента сопротивления на выходном валу СУ: при увеличении ее от 2,14 до 2,68 м/с среднее значение M_c увеличивается на 30%; среднее квадратическое отклонение σ_{M_2} – на 36%; коэффициент вариации v_{M_2} – на 11%. Коэффициент вариации в меньшей степени зависит от изменения скоростных режимов агрегата по сравнению со средним квадратическим отклонением момента сопротивления M_c на выходном валу СУ.

При интерполяции зависимостей вероятностно-статистических оценок момента M_c от рабочей скорости агрегата V_p многочленом по форме Лагранжа были получены выражения, представленные в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Эмпирические зависимости вероятностно-статистических оценок момента сопротивления на выходном валу СУ от скорости движения агрегата ДТ-175С + КЧП-5,4 ($2,14 \leq V_p \leq 2,68$ м/с)

Параметр	Оценка	Расчетная формула
M_2	\bar{M}_2 , Н·м	$-126,543 \bar{V}_p^2 + 946,976 \bar{V}_p - 835,0$
	σ_{M_2} , Н·м	$-95,062 \bar{V}_p^2 + 499,678 \bar{V}_p - 572,168$
	ν_{M_2} , %	$-0,463 \bar{V}_p^2 + 0,0093 \bar{V}_p + 8,6$

б) Тяговый агрегат ДТ-75Н(с ДПМ) + БДТ-3,0.

Вероятностно-статистические оценки входных воздействий при работе тягового агрегата ДТ-75Н + БДТ-3,0 в зависимости от угла атаки дисков бороны и скорости движения представлены в таблице 4.7.

При увеличении угла атаки дисков бороны от 10 до 18° наблюдается повышение среднего значения тягового сопротивления агрегата R_a при работе на III, IV, V передачах в среднем в 1,7 раза.

Таблица 4.7 – Вероятностно-статистические оценки входных воздействий при работе тягового агрегата ДТ-75Н + БДТ-3,0 в зависимости от угла атаки дисков бороны и скорости

Угол атаки дисков бороны, град	\bar{V}_p , м/с	\bar{R}_a , кН	σ_{R_a} , кН	ν_{R_a} , %	\bar{M}_K , Нм	σ_{M_K} , Нм	ν_{M_K} , %
10	2,02	9,6	1,12	И,7	204,9	22,3	10,9
	2,25	11,0	1,34	12,2	233,6	25,8	11,2
	2,40	12,1	1,67	13,8	269,5	34,0	12,6
14	1,85	13,5	1,31	9,7	262,0	24,1	9,2
	1,99	14,6	1,47	10,1	292,8	27,8	9,5
	2,14	15,7	1,77	11,3	328,4	38,1	11,6
18	1,78	17,4	1,46	8,4	290,2	24,7	8,5
	1,90	17,8	1,60	9,0	322,5	29,0	9,0
	2,02	18,5	1,89	10,2	357,7	40,1	11,2

При этом среднее значение момента сопротивления на валу двигателя увеличивается в среднем в 1,4 раза. Наблюдается уменьшение коэффициента вариаций указанных внешних воздействий в среднем в 1,36 и 1,15 раза соответственно.

Общей характеристикой изменения вероятностно-статистических оценок внешних воздействий с увеличением скорости движения агрегата является увеличение их средних значений, средних квадратических отклонений, коэффициентов вариации и степени неравномерности. При этом также уменьшается вероятность согласия теоретических и эмпирических распределений входных воздействий.

Эмпирические распределения тягового сопротивления и момента сопротивления на валу двигателя СМД-18НП выравнивались по нормальному закону.

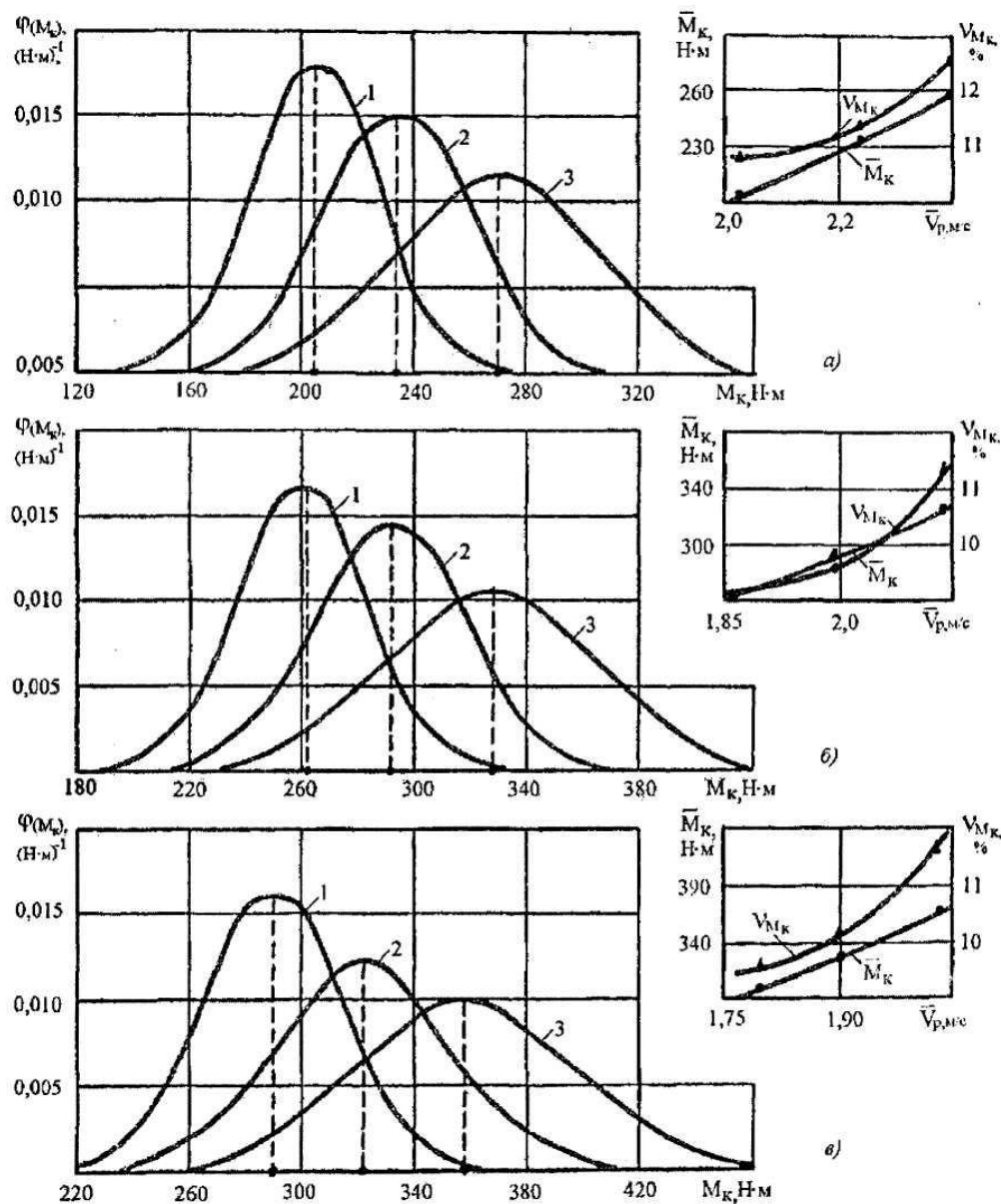


Рисунок 4.12 – Плотности распределения вероятностей момента сопротивления M_k на валу двигателя СМД-18НП (агрегат ДТ-75Н + БДТ-3,0) и оценок распределения от угла атаки дисков бороны а и скорости движения агрегата V_p :

а – $\alpha = 10^\circ$; б – $\alpha = 14^\circ$; в – $\alpha = 18^\circ$; 1 – III передача; 2 – IV передача;
3 – V передача

Графические зависимости плотностей распределения ординат входных воздействий $\varphi(M_K)$, а также их вероятностных оценок от скорости движения агрегата при установленных углах атаки дисков борона показаны на рисунке 4.12.

Зависимости вероятностно-статистических характеристик входных воздействий от скорости движения агрегата, аппроксимированные интерполяционной формулой Лагранжа представлены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Зависимости вероятностно-статистических характеристик входных воздействий от скорости движения агрегата

Показатель	Угол атаки дисков бороны, град	Вероятностно-статистические оценки	Расчетная формула
Тяговое сопротивление агрегата R_a , кН	10	\bar{R}_a , кН	$12,212 - 7,918 \bar{V}_P + 3,280 \bar{V}_P^2$
		σ_{R_a} , кН	$14,060 - 13,016 \bar{V}_P + 3,272 \bar{V}_P^2$
		ν_{R_a} , %	$108,886 - 93,258 \bar{V}_P + 22,349 \bar{V}_P^2$
	14	\bar{R}_a , кН	$-7,686 + 14,793 \bar{V}_P - 1,806 \bar{V}_P^2$
		σ_{R_a} , кН	$10,077 - 10,207 \bar{V}_P + 2,956 \bar{V}_P^2$
		ν_{R_a} , %	$69,702 - 65,241 \bar{V}_P + 17,734 \bar{V}_P^2$
Момент сопротивления на валу двигателя M_{Ki} , Нм	10	\bar{R}_a , кН	$46,696 - 35,0 \bar{V}_P + 10,417 \bar{V}_P^2$
		σ_{R_a} , кН	$16,998 - 18,0 \bar{V}_P + 5,208 \bar{V}_P^2$
		ν_{R_a} , %	$69,958 - 71,667 \bar{V}_P + 20,833 \bar{V}_P^2$
	14	\bar{M}_K , Нм	$1322,925 - 1162,405 \bar{V}_P + 301,449 \bar{V}_P^2$
		σ_{M_K} , Нм	$463,395 - 428,068 \bar{V}_P + 103,814 \bar{V}_P^2$
		ν_{M_K} , %	$125,374 - 108,134 \bar{V}_P + 25,477 \bar{V}_P^2$
	14	\bar{M}_K , Нм	$75,046 - 9,519 \bar{V}_P + 59,771 \bar{V}_P^2$
		σ_{M_K} , Нм	$511,413 - 532,862 \bar{V}_P + 145,649 \bar{V}_P^2$
		ν_{M_K} , %	$155,760 - 154,862 \bar{V}_P + 40,887 \bar{V}_P^2$
	18	\bar{M}_K , Нм	$151,629 - 101,380 \bar{V}_P + 100,687 \bar{V}_P^2$
		σ_{M_K} , Нм	$759,444 - 833,055 \bar{V}_P + 236,108 \bar{V}_P^2$
		ν_{M_K} , %	$200,715 - 213,056 \bar{V}_P + 59,028 \bar{V}_P^2$

Вероятностно статистические оценки и эмпирические зависимости агротехнических показателей тяговых агрегатов ДТ-175С+КЧП-5,4 и ДТ-75Н+БДТ-3,0 от скорости их движения представлены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Вероятностно-статистические оценки и эмпирические зависимости агротехнических показателей тяговых агрегатов от скорости их движения

Агрегат	Вероятностно-статистическая оценка	V _P , м/с		
		2,14	2,38	2,68
ДТ-175С+КЧП-5,4	\bar{h} , см	18,80	18,14	17,60
	σ_h , см	1,6	2,7	3,5
	v_h , %	7,3	9,9	12,6
ДТ-75Н+БДТ-3,0	\bar{h} , см σ_h , см v_h , %	V _P , м/с		
		2,02	2,25	2,40
		9,26	9,05	9,0
		1,70	1,90	2,15
		8,0	9,8	10,3
Агрегат	Вероятностно-статистическая оценка	Расчетная формула		
ДТ-175С+КЧП-5,4	\bar{h} , см	$1,759V_P^2 - 10,702V_P + 33,645$		
	σ_h , см	$-3,549V_P^2 + 20,626V_P - 26,286$		
	v_h , %	$-3,395V_P^2 + 26,179V_P - 33,175$		
ДТ-75Н+БДТ-3,0	\bar{h} , см	$1,525V_P^2 - 7,427V_P + 18,038$		
	σ_h , см	$2,098V_P^2 - 8,078V_P + 9,477$		
	v_h , %	$-11,823V_P^2 + 58,310V_P - 61,544$		

4.5. Корреляционно-спектральный анализ входных параметров тяговых агрегатов на базе тракторов ДТ-75Н и ДТ-175С

Интенсификация скоростных и нагрузочных режимов работы требует более глубокого изучения закономерностей изменения внешних воздействий и выходных параметров машинно-тракторных агрегатов. Данные закономерности необходимы для обоснования допускаемых режимов работы агрегатов, что в свою очередь неразрывно связано с наиболее полным математическим описанием исследуемых процессов. При этом должна учитываться специфика условий работы машинно-тракторных агрегатов и внутренняя структура (или динамика) выполняемых ими процессов.

Динамика процессов наиболее полно и четко проявляется в характере протекания их корреляционных функций и спектральных плотностей. Корреляционные функции и спектральные плотности внешних воздействий и выходных параметров агрегатов являются дополнительными оценками, характеризующими их динамику во временной и частотной областях [1, 117, 119]. При аппроксимации корреляционных функций и спектральных плотностей входных воздействий устанавливают значения коэффициентов α и β , которые характеризуют интенсивность затухания корреляционной функции и частоту периодической составляющей рассматриваемого случайного процесса.

а) Тяговый культиваторный агрегат ДТ-175С+КЧП-5,4.

На рисунке 4.13 представлены нормированные (отнесенные к дисперсии) корреляционные функции и спектральные плотности момента сопротивления M_c на выходном валу силовой установки трактора ДТ-175С. При средней глубине обработки $h = 20$ см основной спектр дисперсий агрегата $M_c(t)$ в диапазоне рабочих скоростей $\bar{V}_P = 2,14\text{--}2,68$ м/с приходится на частоты $0\text{--}20$ с⁻¹ ($0\text{--}3,2$ Гц), а максимум спектральной плотности соответствует частотам $3\text{--}6$ с⁻¹ ($0,5\text{--}1,0$ Гц).

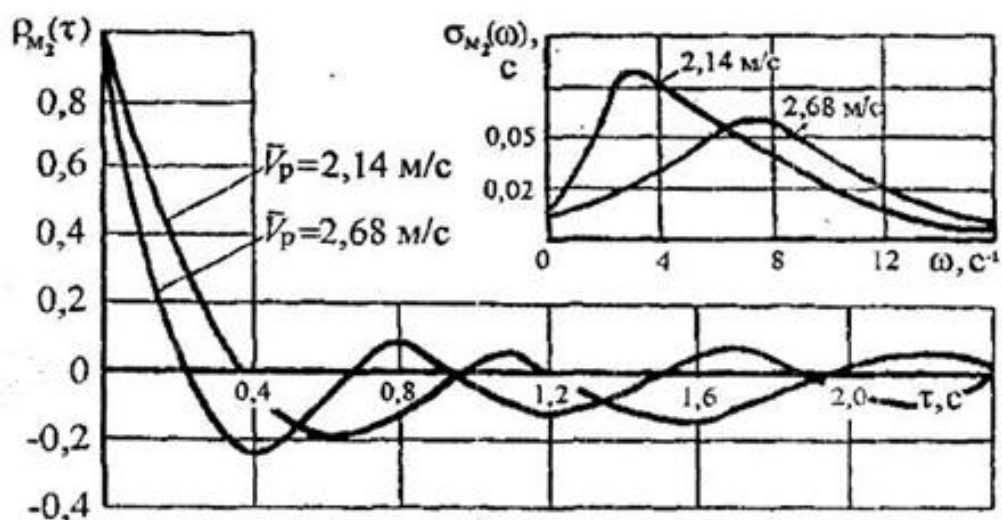


Рисунок 4.13 – Нормированные корреляционные функции и спектральные плотности моментов сопротивления на выходном валу силовой установки при работе культиваторного агрегата

Время спада корреляционных функций процесса $M_c(t)$ снижалось от 0,4 до 0,25 с. Значения коэффициентов α и β при этом изменялись соответственно в следующих пределах: $\alpha = 2,0\text{--}2,4\text{ с}^{-1}$ и $\beta = 3,9\text{--}5,2\text{ с}^{-1}$.

Закономерностью изменения корреляционно-спектральных оценок момента сопротивления M_c с увеличением скорости движения агрегата является сокращение времени корреляционной связи τ , увеличение коэффициентов α и β , растягивание спектра частот процесса $M_c(t)$, что свидетельствует о повышении его динамичности.

С повышением скорости движения агрегата в спектре случайного процесса $M_c(t)$ преобладание низкочастотных составляющих становится менее выраженным, больший удельный вес приобретают высокочастотные составляющие.

В зоне пониженных скоростей движения агрегата наблюдается более плавное затухание корреляционной функции. Процесс $M_c(t)$ протекает с меньшей динамичностью, а преобладание низких частот в энергетическом спектре становится более выраженным. Кривая спектральной плотности деформируется как по высоте (вытягивается вверх), так и по ширине (сужается с боков).

Смещение энергетического спектра в сторону более высоких частот не является отрицательной закономерностью при повышении

скоростного режима работы культиваторного агрегата, так как высокочастотные составляющие внешних воздействий в меньшей степени воспринимаются трактором вследствие их инерционности.

Преобладание высокочастотных составляющих в энергетическом спектре входного внешнего воздействия (в данном случае момента M_c) с увеличением рабочих скоростей является благоприятным по отношению к математическим ожиданиям выходных параметров (энергетических показателей СУ), на которые существенное влияние оказывают низкочастотные колебания внешних воздействий.

б) Тяговый машинно-тракторный агрегат ДТ-75Н+БДТ-3,0

Тяговое сопротивление агрегата

На рисунке 4.14 представлены нормированные корреляционные функции и спектральные плотности тягового сопротивления агрегата ДТ-75Н+БДТ-3,0 при угле атаки дисков бороны, равном 18° .

Время корреляционной связи в диапазоне рабочих скоростей агрегата $\bar{V}_P=1,78-2,02$ м/с изменялось в пределах $0,25-0,15$ с. Основной спектр дисперсий процесса $R_a(t)$ приходится на диапазон частот $0-16$ с⁻¹ ($0-2,5$ Гц), максимумы энергетических спектров тягового сопротивления при этом соответствовали частотам $1-11$ с⁻¹ ($0,3-1,8$ Гц). Для указанных скоростей движения агрегата значения коэффициентов α и β находились соответственно в пределах: $\alpha = 3,2-3,8$ с⁻¹ и $\beta = 4,9-8,1$ с⁻¹.

Момент сопротивления на валу двигателя

Нормированные корреляционные функции и спектральные плотности момента сопротивления на валу двигателя СМД-18НП трактора ДТ-75Н при дисковании показаны на рисунке 4.14, б.

Максимумы энергетических спектров процесса $M_k(t)$ в диапазоне рабочих скоростей агрегата $\bar{V}_P=1,78-2,02$ м/с и угле атаки дисков бороны, равном 18° , соответствовали частотам $3-10$ с⁻¹ ($0,5-1,6$ Гц). Основной спектр частот процесса $M_k(t)$ находится в пределах $0-16$ с⁻¹ ($0-0,5$ Гц). Время корреляционной связи τ при этом уменьшилось от $0,35$ до $0,2$ с. Значения коэффициентов α и β изменялись соответственно в пределах: $\alpha = 2,9-4,2$ с⁻¹ и $\beta = 4,7-7,8$ с⁻¹.

Таким образом, общей закономерностью изменения корреляционно-спектральных оценок внешних воздействий с увеличением ско-

рости движения агрегата является сокращение времени корреляционной связи τ , увеличение коэффициентов α и β , растягивание спектра частот процессов $R_a(t)$ и $M_k(t)$, что характеризует повышение их динамичности.

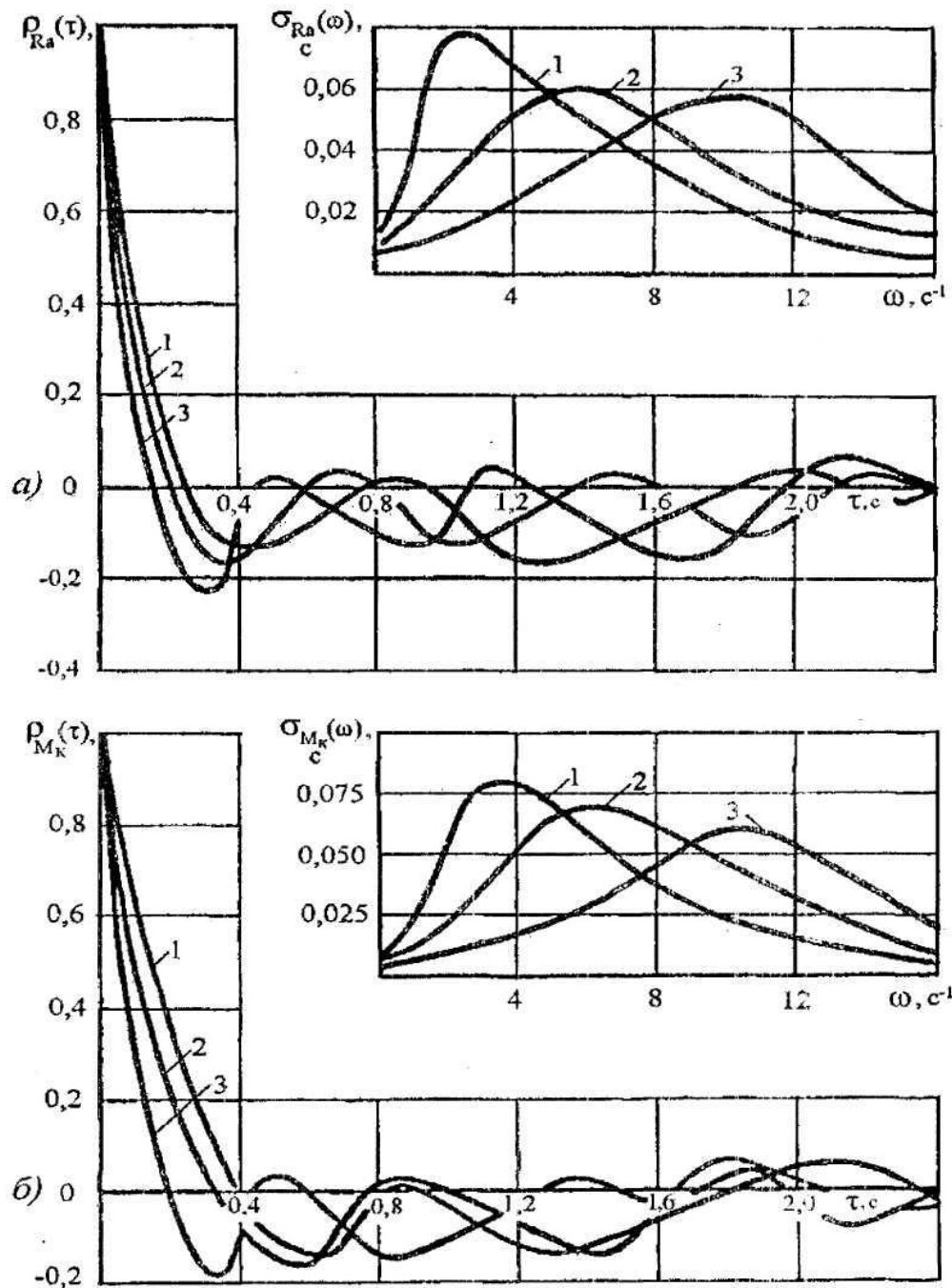


Рисунок 4.14 – Нормированные корреляционные функции и спектральные плотности: а – тягового сопротивления $R_a(t)$ агрегата ДТ-75Н+БДТ-3,0;

б – момента сопротивления на валу двигателя $M_k(t)$;

1 – $\bar{V}_P = 1,78$ м/с; 2 – $\bar{V}_P = 1,9$ м/с; 3 – $\bar{V}_P = 2,02$ м/с

Выводы

1. Эмпирические распределения крутящего момента на ведущем колесе и частоты вращения вала двигателя трактора Т-170Б хорошо согласуются с нормальным законом распределения. В диапазоне скоростей 2,55–3,58 км/ч вероятность согласия $P(\chi^2)$ по результатам обработки экспериментальных данных находилась для крутящего момента в пределах 0,25–0,6, для частоты вращения вала дизеля в пределах 0,32–0,12. Спектр амплитуд колебаний входных воздействий на МТА находится в низкочастотной зоне, что негативно влияет на выходные параметры агрегата.

2. Экспериментально установлено, что распределения внешних воздействий (тягового сопротивления агрегата, момента сопротивления на валу двигателя и выходном валу силовой установки, тягового момента сопротивления, момента сопротивления на валу отбора мощности) хорошо согласуются с нормальным законом – вероятность согласия $P(\chi^2)$ находилась в пределах от 0,26 до 0,80 – для тяговых агрегатов и от 0,24 до 0,74 – для тягово-приводных. Коэффициент корреляции r между моментами сопротивления на ведущих полуосях и ВОМе тракторов при работе тягово-приводных агрегатов составил в среднем 3,3%. В эксплуатационных расчетах его можно не учитывать.

3. Увеличение рабочей скорости движения тяговых и тягово-приводных агрегатов сопровождается растягиванием спектра дисперсии входных воздействий и смещением его максимума в сторону более высоких частот. Смещение энергетического спектра в сторону более высоких частот является благоприятным, так как они в меньшей степени воспринимаются дизельными энергоустановками, что способствует более устойчивой их работе.

4. Общей закономерностью изменения энергетических и технико-экономических показателей тяговых и тягово-приводных агрегатов с трактором ДТ-75Н и ДТ-175С в эксплуатационных условиях является снижение эффективной (выходной) мощности, часового расхода топлива, часовой производительности и увеличение удельного и погектарного расхода топлива, удельных затрат денежных средств и прямых топливно-энергетических затрат при увеличении коэффициента вариации внешней нагрузки. Средние значения относительных

расхождений между теоретическими и экспериментальными значениями энергетических и технико-экономических показателей тяговых и тягово-приводных агрегатов на базе тракторов с ДПМ и ГМТ не превышают 2%, что свидетельствует о достаточно высокой достоверности полученных теоретических предпосылок вероятностно-статистической оценки выходных параметров машинно-тракторных агрегатов.

Полученные экспериментальные данные позволяют утверждать, что математические модели оценки влияния стохастических входных воздействий на выходные параметры сельскохозяйственных агрегатов обладают высокой адекватностью:

входные переменные распределены по нормальному закону;

в спектре амплитуд колебаний внешних воздействий на МТА преобладают низкочастотные составляющие.

5. ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ МТА

5.1. 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 паретодимирования, 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.

5.1.1. Порядок работы с программой

После запуска программы открывается окно, представленное на рисунке 5.1. 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 (см. рисунок 5.2). После ввода области определения переменной n_x в строке «введите точность переменной 0» задается точность переменной, например – 1 (рисунок 5.2).

Аналогично переменной n_x вводятся последовательно области значений и точность измерения остальных переменных целевых функций оптимизационного алгоритма (рисунки 5.3–5.11):

интервал 1 – n_n (номинальные обороты двигателя);
 интервал 2 – n_{min} (минимально устойчивые обороты двигателя);
 интервал 3 – M_n (номинальный крутящий момент на валу двигателя);
 интервал 4 – M_k (текущие средние значения крутящего момента);
 интервал 5 – k (коэффициент приспособляемости по крутящему моменту);
 интервал 6 – v_M (коэффициент вариации момента M_k);
 интервал 7 – $G_{тх}$ (часовой расход топлива на оборотах холостого хода двигателя);
 интервал 8 – $G_{тн}$ (часовой расход топлива при номинальном крутящем моменте двигателя M_n);
 интервал 9 – $k_{об}$ (коэффициент приспособляемости двигателя по оборотам).

После ввода значений всех переменных задачи производится настройка параметров генетического алгоритма (рисунки 5.12–5.14):

размер популяции (означает сколько индивидов будет в популяции, с помощью которой будет осуществляться 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).

5.1.2. Результаты работы алгоритма

Результаты работы генетического алгоритма представлены на рисунке 5.15. По результатам каждого прогона алгоритма программа выдает лучшую точку из множества Парето относительно двух критериев (максимум эффективной мощности двигателя N_e и, соответственно, производительности агрегата $W_{\text{ч}}$; минимум часового расхода топлива $G_{\text{т}}$). Лучшая точка содержит оптимальные значения пере-

менных $n_x, n_n, n_{min}, M_n, M_k, k, G_{TX}, G_{TH}, k_{об}$. Исходя из оптимальных значений переменных (оптимальных 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.

Многокритеральный генетический алгоритм решения оптимизационной задачи с использованием параметров тяговой характеристики трактора работает аналогично представленному выше алгоритму оптимизации параметров стендовой характеристики. Критериями данного алгоритма являются тяговая мощность трактора на данной передаче $N_{кр}$ и часовой расход топлива на данной передаче G_T . В качестве переменных целевых функций $N_{кр} = f(P_{кр})$ и $G_T = f(P_{кр})$ используются значения $n_x, n_n, n_{min}, M_n, M_{max}, k, i_{тр}$ (передаточное число трансмиссии трактора); η_{mp} (механический КПД трансмиссии); r_k (расчетный диаметр ведущего колеса или кинематический радиус ведущей звездочки); m_s (эксплуатационная масса трактора); f (коэффициент сопротивления качению); g (ускорение силы тяжести); δ (буксование трактора); v_p (коэффициент вариации силы тяги на крюке трактора); $P_{кр}$ (текущее среднее значение силы тяги). Настройка параметров алгоритма оптимизации тяговой характеристики аналогична настройке алгоритма, представленной выше.

Лучшие точки в каждом прогоне алгоритма содержат данные по оптимальным значениям параметров $V_{p.x}$ (скорость движения трактора холостого хода); $V_{p.n}$ (скорость движения трактора при номинальном режиме); $V_{p.min}$ (скорость движения при максимальной загрузке трактора); $P_{кр.n}$ (номинальная сила тяги); $P_{кр.max}$ (сила тяги при максимальном крутящем моменте); $P_{кр}$ (значение силы тяги, соответствующее оптимальной загрузке трактора при текущем значении коэффициента вариации v_p); G_{TH}, G_{TX}, G_{TO} .

С учетом коэффициента вариации v_p в каждом прогоне рассчитаны значения $N_{кр}$ и G_T , соответствующие оптимальным значениям параметров тяговой характеристики.

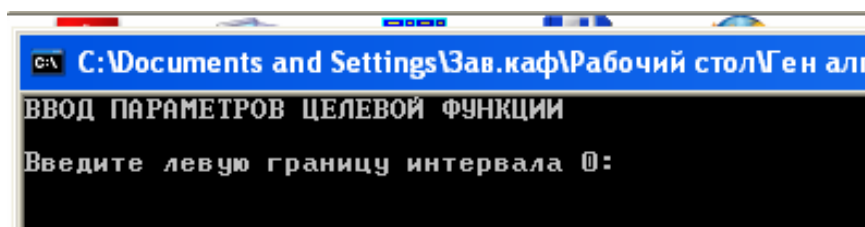


Рисунок 5.1 – Окно для ввода области определения переменной n_x

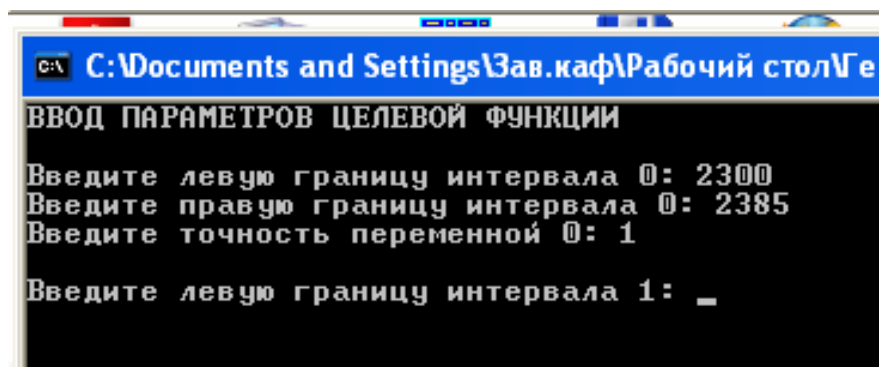


Рисунок 5.2 – Окно для ввода области определения переменной n_x

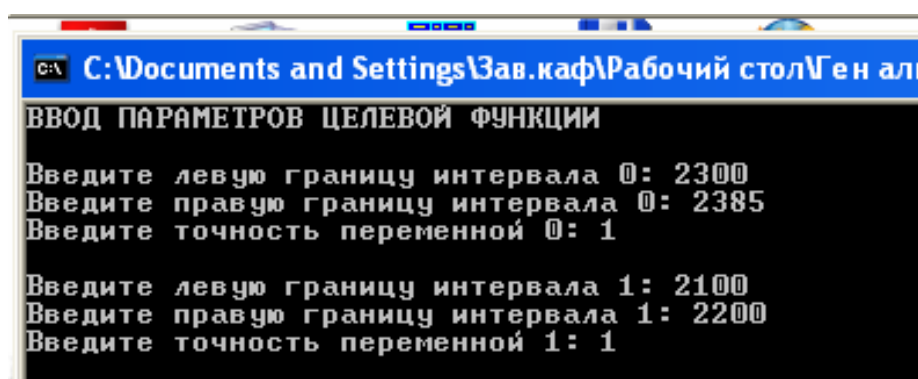


Рисунок 5.3 – Окно для ввода области определения переменной n_n

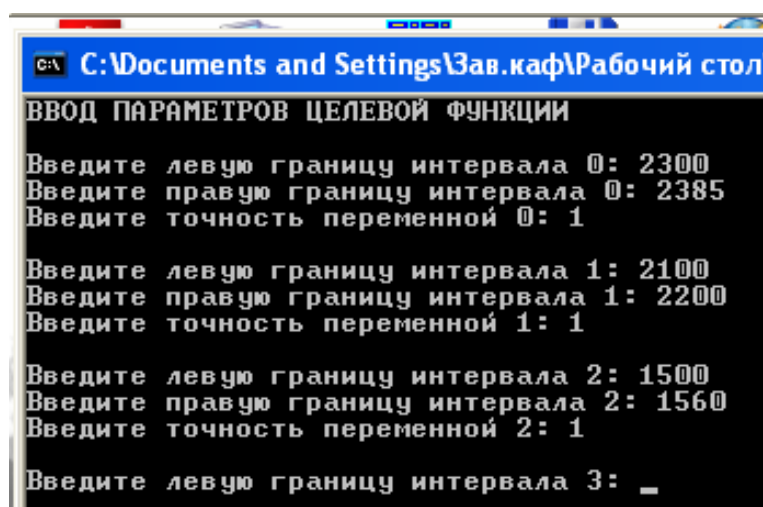


Рисунок 5.4 – Окно для ввода области определения переменной n_{min}

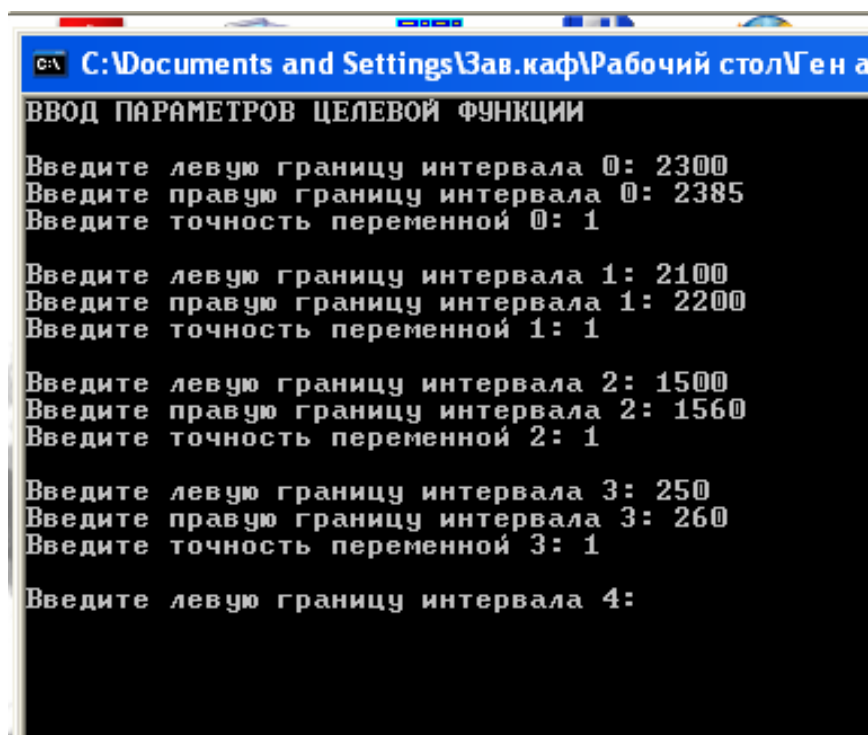


Рисунок 5.5 – Окно для ввода области определения переменной M_n

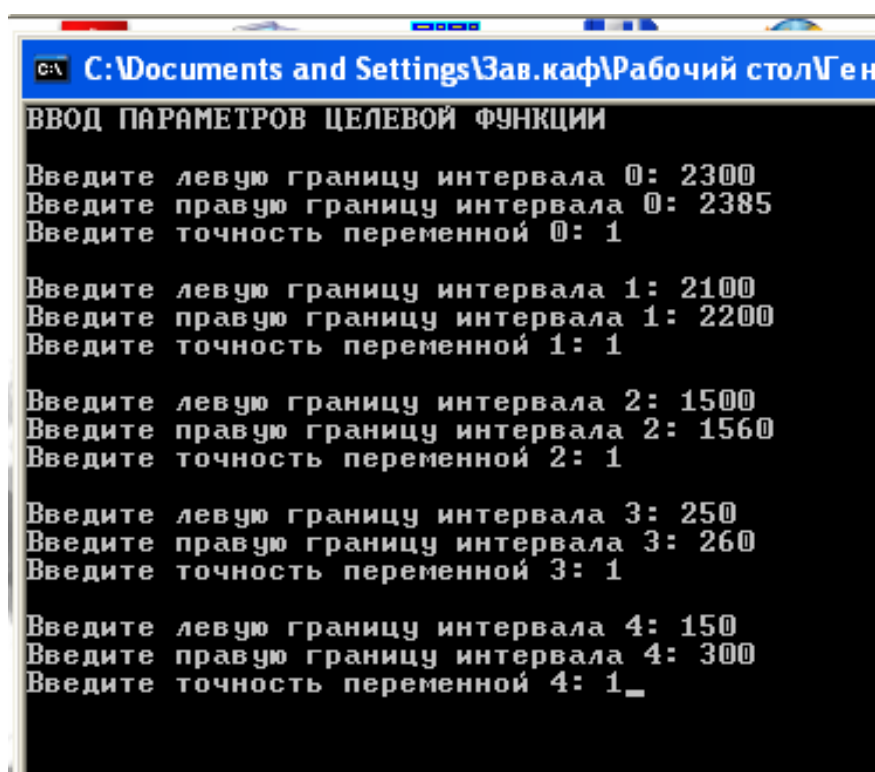


Рисунок 5.6 – Окно для ввода области определения переменной M_k

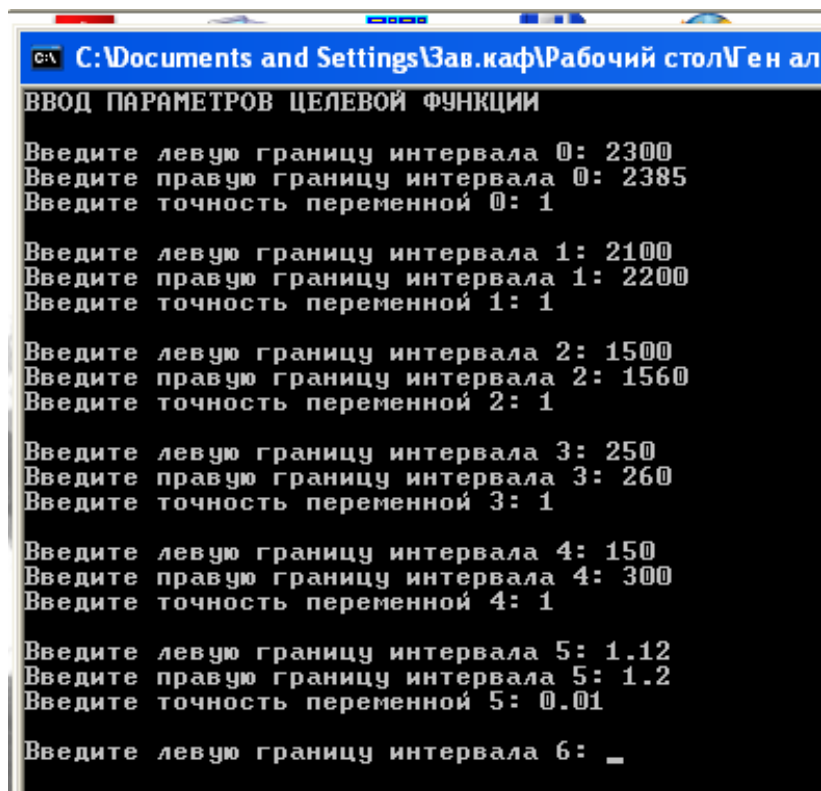


Рисунок 5.7 – Окно для ввода области определения переменной k

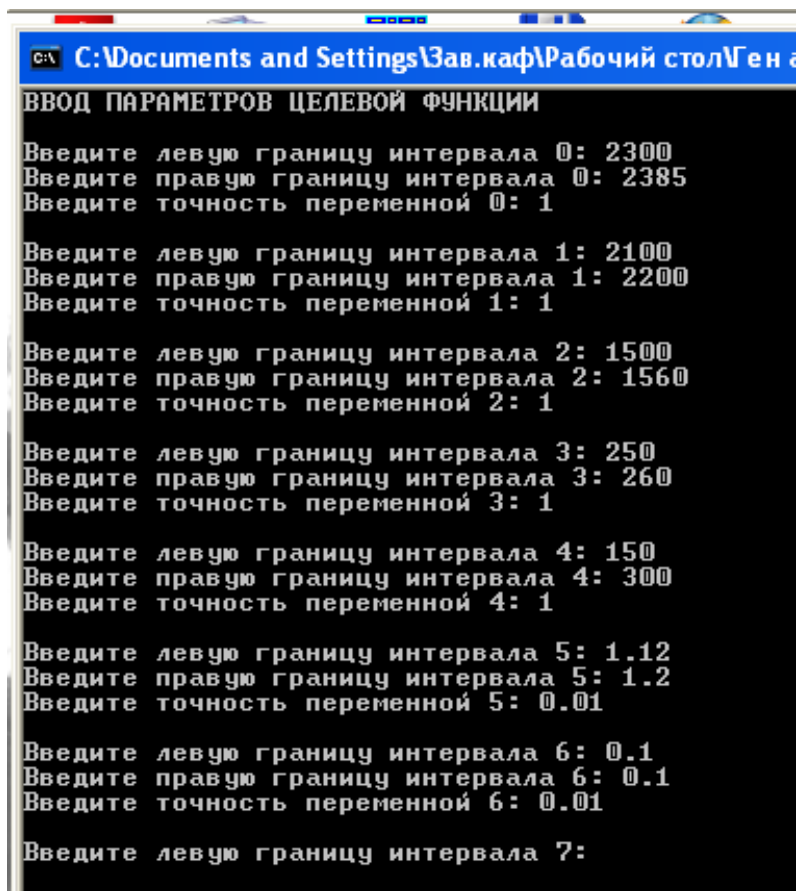


Рисунок 5.8 – Окно для ввода области определения переменной v_m

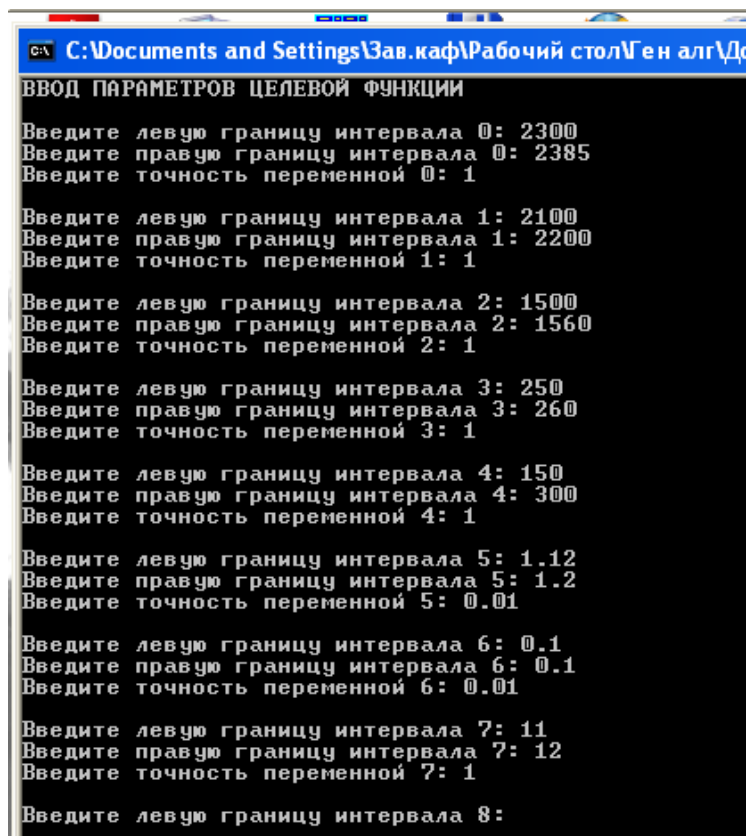


Рисунок 5.9 – Окно для ввода области определения переменной $G_{\text{ТХ}}$

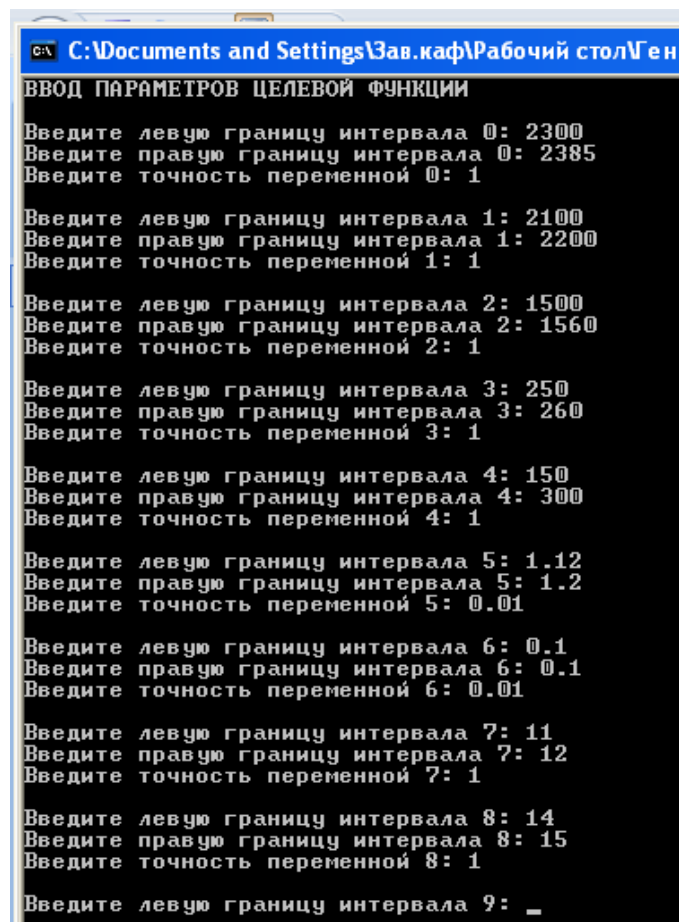


Рисунок 5.10 – Окно для ввода области определения переменной $G_{\text{ТН}}$

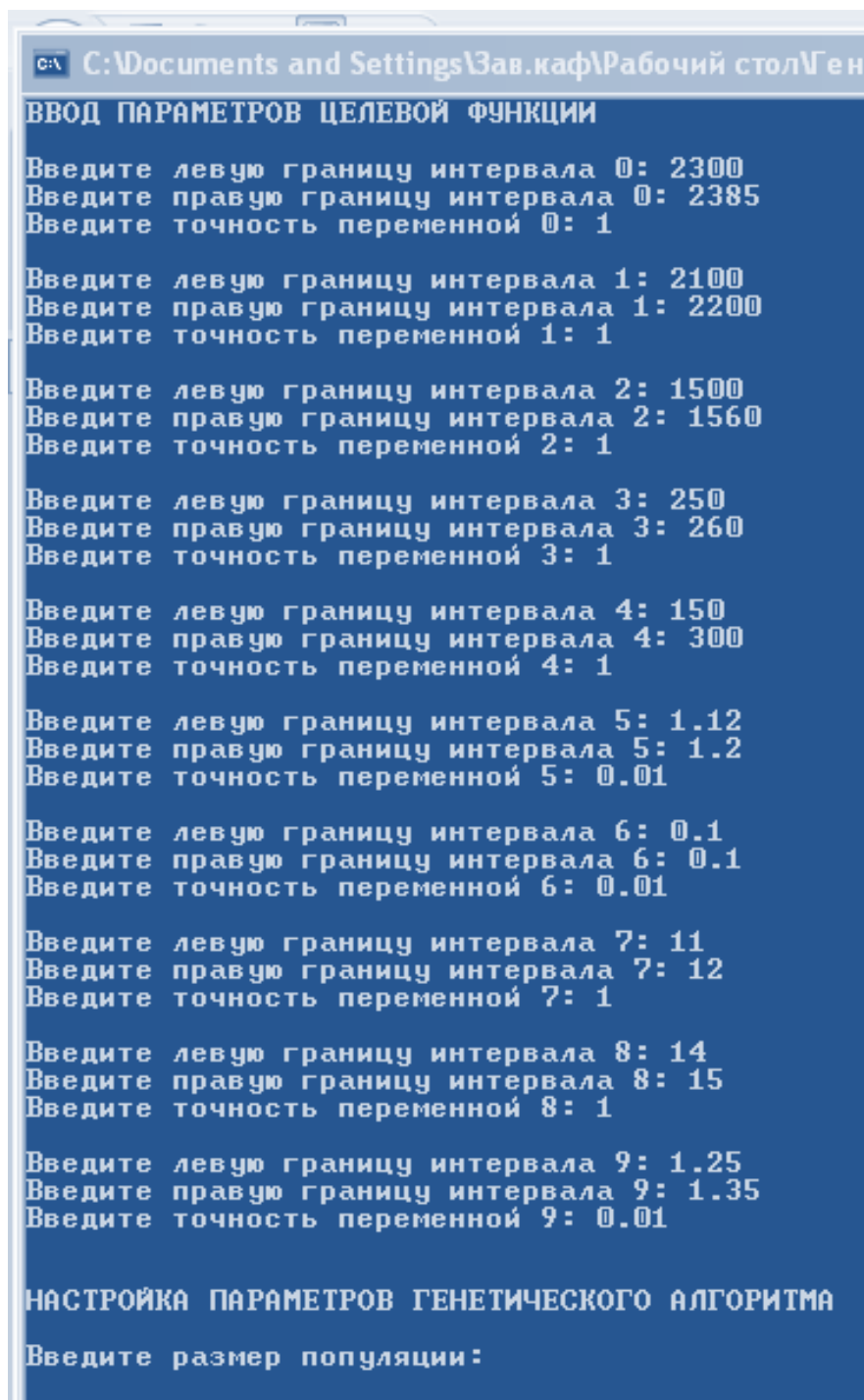


Рисунок 5.11 – Окно для ввода области определения переменной $k_{об}$:
 $k_{об}$ – коэффициент приспособляемости двигателя по оборотам, для вновь проектируемых двигателей рекомендуется принимать $k_{об} = 1,25–1,35$

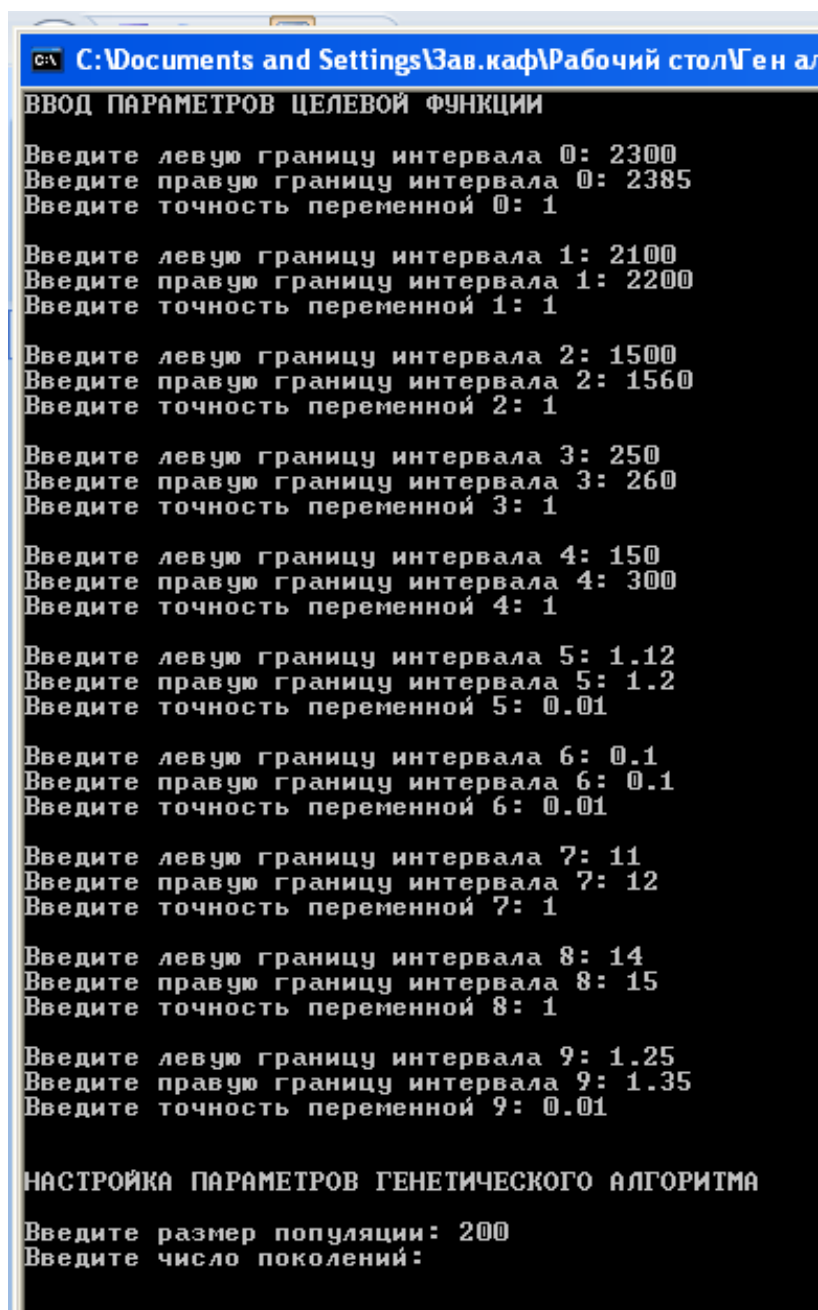


Рисунок 5.12 – Выбор размера популяции

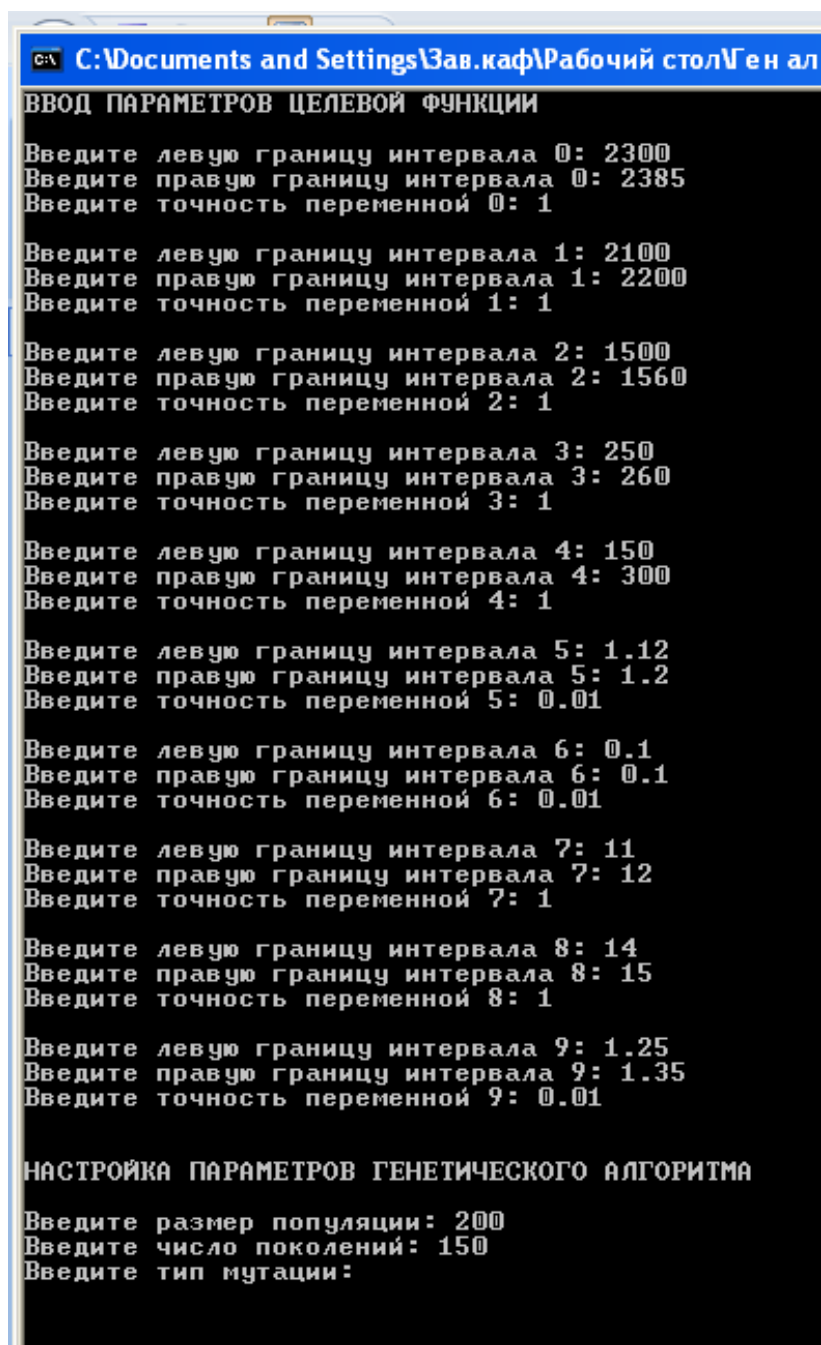


Рисунок 5.13 – Выбор числа поколений

```
C:\Documents and Settings\Зав.каф\Рабочий стол\Ген алг\Доработанн
ВВОД ПАРАМЕТРОВ ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ
Введите левую границу интервала 0: 2300
Введите правую границу интервала 0: 2385
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: 1500
Введите правую границу интервала 2: 1560
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: 150
Введите правую границу интервала 4: 300
Введите точность переменной 4: 1
Введите левую границу интервала 5: 1.12
Введите правую границу интервала 5: 1.2
Введите точность переменной 5: 0.01
Введите левую границу интервала 6: 0.1
Введите правую границу интервала 6: 0.1
Введите точность переменной 6: 0.01
Введите левую границу интервала 7: 11
Введите правую границу интервала 7: 12
Введите точность переменной 7: 1
Введите левую границу интервала 8: 14
Введите правую границу интервала 8: 15
Введите точность переменной 8: 1
Введите левую границу интервала 9: 1.25
Введите правую границу интервала 9: 1.35
Введите точность переменной 9: 0.01
НАСТРОЙКА ПАРАМЕТРОВ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА
Введите размер популяции: 200
Введите число поколений: 150
Введите тип мутации: 3
Введите количество прогонов: 4
```

Рисунок 5.14 – Выбор типа мутации и количества прогонов

```
C:\Documents and Settings\Зав.каф\Рабочий стол\Ген алг\Доработанный под ВЕГА ПОС\WEGA_st.exe
Введите точность переменной 5: 0.1
Введите левую границу интервала 6: 0.2
Введите правую границу интервала 6: 0.2
Введите точность переменной 6: 0.01

Введите левую границу интервала 7: 11
Введите правую границу интервала 7: 12
Введите точность переменной 7: 1

Введите левую границу интервала 8: 14
Введите правую границу интервала 8: 15
Введите точность переменной 8: 1

Введите левую границу интервала 9: 1.25
Введите правую границу интервала 9: 1.35
Введите точность переменной 9: 0.1

НАСТРОЙКА ПАРАМЕТРОВ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА
Введите размер популяции: 250
Введите число поколений: 200
Введите тип мутации: 3
Введите количество прогонов: 10

ПОИСК ОПТИМАЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Прогон#1
Лучшая точка <2364,2199,1560,260,255,1.12,0.2,11,14,1.35>,
значение функции Ne = 46.6283, Gt = 13.0315 найдена в 125 поколении.

Прогон#2
Лучшая точка <2362,2200,1559,260,251,1.12,0.2,11,14,1.35>,
значение функции Ne = 47.2525, Gt = 13.0917 найдена в 164 поколении.

Прогон#3
Лучшая точка <2360,2195,1560,260,243,1.12,0.2,11,14,1.35>,
значение функции Ne = 48.1457, Gt = 13.1915 найдена в 196 поколении.

Прогон#4
Лучшая точка <2385,2102,1560,256,267,1.12,0.2,11,14,1.35>,
значение функции Ne = 42.6246, Gt = 12.7239 найдена в 163 поколении.

Прогон#5
Лучшая точка <2382,2200,1559,260,241,1.12,0.2,11,14,1.35>,
значение функции Ne = 48.3989, Gt = 13.2121 найдена в 177 поколении.

Прогон#6
Лучшая точка <2379,2200,1555,260,245,1.12,0.2,11,14,1.35>,
значение функции Ne = 47.9805, Gt = 13.1692 найдена в 177 поколении.

Прогон#7
Лучшая точка <2372,2199,1560,260,260,1.12,0.2,11,14,1.35>,
значение функции Ne = 45.6829, Gt = 12.947 найдена в 179 поколении.

Прогон#8
Лучшая точка <2371,2200,1555,260,232,1.12,0.2,11,14,1.35>,
значение функции Ne = 48.7274, Gt = 13.2819 найдена в 162 поколении.

Прогон#9
Лучшая точка <2371,2199,1555,260,242,1.12,0.2,11,14,1.35>,
значение функции Ne = 48.2354, Gt = 13.202 найдена в 138 поколении.

Прогон#10
Лучшая точка <2385,2199,1560,260,235,1.12,0.2,11,14,1.35>,
значение функции Ne = 48.7257, Gt = 13.2627 найдена в 136 поколении.

_

ПУСК C:\Documents and Se...
```

Рисунок 5.15 – Результаты работы алгоритма

5.2. Программное средство для однокритериальной оптимизации энергозатрат при использовании машинно-тракторных агрегатов по максимуму мощности двигателя

```
#include <iostream>
#include <cstdlib>
#include <stdlib.h>
#include <conio.h>
#include <time.h>
#include <fstream>
using namespace std;
#define _USE_MATH_DEFINES
#include <math.h>

void cross(int*, int*, int*, int);
void cross_2(int*, int*, int*, int);
void mutation_(int*, int, int);
int tour_sel (float*, int, int);
int proportional_sel (float*, int);
int rank_sel (float*, int);
int lucky (float*, int);
int genotype_len (float, float, float);
double bin_to_dec (int*, int);
bool test_segment (float, float, float);
int fitness_filling (int, float*, bool);
int grey_decode (int*&, int);
int xor (int, int);
double func_laplace(double, double);
double Ne (int, int, int, double, double, double, double);
double Gt (double, double, int, double, double, double, double, double, double);
double fine_function(double, float**, double*, int, int, int);
float* possible;
float* fitness;

int main () {
    srand (time (NULL));
    setlocale (0, "");
    int popul_size = 0; // Размер популяции
```

```

int len = 0; // Длина гена
int itr = 0; // Поколение
int find_itr = 0; // Поколение в которой найдено лучшее решение
int mut = 0; // Вероятность мутации, (%)
int repeat = 0; // Прогон алгоритма
int numb_of_variables = 7; // Число переменных оптимизируемой
функции
    float** segments = new float*[numb_of_variables]; // Массив с гра-
ницами переменных
    double* precision = new double[numb_of_variables]; // Массив с
точностью переменных
    //-----
    // Заполнение массивов границ и точности
    //-----
    cout << "ВВОД ПАРАМЕТРОВ ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ" << endl
<< endl;
    for (int i = 0; i < numb_of_variables; i++){
        segments[i] = new float [2];
        cout << "Введите левую границу интервала " << i << ": ";
        cin >> segments [i] [0];
        cout << "Введите правую границу интервала " << i << ": ";
        cin >> segments [i] [1];
        cout << "Введите точность переменной " << i << ": ";
        cin >> precision [i];
        cout << endl;
    }
    int* lens_of_variables = new int [numb_of_variables]; // Массив с
длинами каждой переменной в бинарном виде
    //-----
    // Вычисление длин переменных в бинарном виде
    //-----
    for (int i = 0; i < numb_of_variables; i++){
        lens_of_variables[i] = genotype_len (segments [i] [0], segments
[i] [1], precision [i]);
        len += lens_of_variables [i];
    }
    //-----
    //Ввод значений пользователем
    //-----

```

```

    cout << endl << "НАСТРОЙКА ПАРАМЕТРОВ ГЕНЕТИЧЕ-
СКОГО АЛГОРИТМА" << endl << endl;
    cout << "Введите размер популяции: ";
    cin >> popul_size;
    cout << "Введите число поколений: ";
    cin >> itr;
    cout << "Введите тип мутации: ";
    cin >> mut;
    cout << "Введите количество прогонов: ";
    cin >> repeat;
    cout << endl << "ПОИСК ОПТИМАЛЬНОГО РЕШЕНИЯ"
<< endl << endl;
    possible = new float[popul_size]; // Массив вероятностей быть
отобранным к скрещиванию для каждого индивида популяции
    fitness = new float [popul_size]; // Массив значений функции при-
годности для каждого индивида
    int mismatch = 0, find_gen = 0;
    //-----
    // Начало алгоритма
    //-----
    for (int rep = 0; rep < repeat; rep++){
        //-----
        // Инициализируем популяцию случайными значениями
        //-----
        int** population = new int*[popul_size];
        for (int i = 0; i < popul_size; i++){
            population [i] = new int [len];
            possible [i] = 0;
            fitness [i] = 0;
            for (int j = 0; j < len; j++){
                population[i][j] = rand()%2;
            }
        }
        float* functional = new float[popul_size]; // Массив значений
функции для каждого индивида
        int* superman = new int[len]; // Лучший индивид в популя-
ции
        float best = -10000000; // Лучшее значение функции

```

```

double* best_pos = new double[numb_of_variables]; // Точка с
лучшим значением функции
for (int i = 0; i < numb_of_variables; i++){
    best_pos[i] = 0;
}
for (int gener = 0; gener < itr; gener++){
    //cout << "Поколение: " << gener << endl;
    for (int i = 0; i < popul_size; i++){
        int left_limit = 0; //Левая граница переменной в
строке

        int right_limit = 0; // Правая граница переменной в
строке

        double* point = new double[numb_of_variables];
//Массив хранящий значение координат в десятичном виде
//-----
// Расшифровка генотипа
//-----
        for (int j = 0; j < numb_of_variables; j++){
            point[j]=0; //Значение точки
            right_limit += lens_of_variables[j]; // Вычис-
ляем правую границу
            int* genotype_of_one_var = new
int[lens_of_variables[j]]; // Создаем массив одной переменной в двоич-
ном виде

            for (int n = left_limit; n < right_limit; n++){
                genotype_of_one_var[n - left_limit] =
population[i][n]; // Заполняем массив значениями из основного гено-
типа
            }

            grey_decode(genotype_of_one_var,lens_of_variables[j]); // Перево-
дим из рефлексивного кода Грея в двоичную форму
            left_limit += lens_of_variables[j]; // Переме-
щаем левую границу для следующей переменной
            point[j] = segments [j] [0] + (double)
bin_to_dec (genotype_of_one_var, lens_of_variables [j])*precision [j]; //
Находим значение точки в десятичном виде
            delete [] genotype_of_one_var; // уда-
ляем массив кода одной переменной
        }

```



```

bool out_of_segment = 0; // Флаг выхода за границы
области поиска
//-----
// Проверка на нахождение точки в заданной области
//-----
for (int j = 0; j < numb_of_variables; j++){
    if(!test_segment(point[j], segments[j][0], segments
[j] [1])){
        out_of_segment = 1;
        functional[i] = -1000;
        break;
    }
}
if (!out_of_segment){
    functional [i] = Ne (point [0], point [1], point [2],
point [3], poin t[4], point [5], point [6]); // Вычисление значения функ-
ции
}
//-----
// Проверка не является ли найденное решение луч-
шим
//-----
if (best<functional[i]){
    best=functional[i]; // Здесь перепроверка не требу-
ется, так как новое решение должно быть строго лучше старого, что-
бы заменить его
    for (int n = 0; n < numb_of_variables; n++){
        best_pos [n] = point [n]; // Сохранение коор-
динат лучшей точки
    }
    find_itr = gener;
    for (int s = 0; s < len; s++){
        superman [s] = population [i] [s]; // Сохране-
ние генотипа лучшей точки
    }
}
delete [] point; // Удаление массива со значением коор-
динаты в десятичной форме
}

```

```

        fitness_filling (popul_size,functional,1); // Вычисление
функции пригодности
        int** inter_popul = new int*[popul_size]; // Создание
промежуточной популяции для взятия индивидов на генетические
операции

        for (int i = 0; i < popul_size; i++){
            inter_popul [i] = new int [len];
        }
        for (int i = 0; i < popul_size; i++){
            for (int j = 0; j < len; j++){
                inter_popul [i][j] = population [i][j];
            }
        }
        for (int i = 0; i < popul_size - 1; i++){
            cross_2 (inter_popul [tour_sel (fitness, po-
pul_size,2)], inter_popul [tour_sel(fitness,popul_size,2)], population [i],
len); // Скрещивание (применяется турнирная селекция)
        }
        for (int i = 0; i < len; i++){
            population[popul_size - 1][i] = superman [i]; //
Прямое копирование лучшего индивида в следующее поколение
        }
        for(int i = 0; i < popul_size; i++){
            mutation_(population [i], len,mu); // Оператор му-
тации
        }
        for (int i = 0; i < popul_size; i++){
            delete [] inter_popul[i]; // Истребление промежу-
точной популяции
        }
        delete[] inter_popul;
        cout << " / rПоколение: " << gener +1 << " Ne = " <<
best;
    }
    cout << " / r";
    cout << endl << "Прогон#" << rep + 1 << endl;
    cout << "Лучшая точка (" << best_pos [0] << "," << best_pos
[1] << "," << best_pos [2] << "," << best_pos [3] << "," << best_pos [4]
<< "," << best_pos [5] << "," << best_pos [6] << ")," << endl << "значе-

```

```

ние функции " << Ne (best_pos [0], best_pos [1], best_pos [2], best_pos
[3], best_pos [4], best_pos [5], best_pos [6]) << " найдена в " << find_itr
<< " поколения." << endl << endl;
    for (int i = 0; i < popul_size; i++){
        delete [] population [i];
    }
    delete [] population;
    delete [] superman;
    delete [] functional;
    delete [] best_pos;
}
for (int i = 0; i < numb_of_variables; i++){
    delete [] segments[i];
}
delete [] segments;
delete [] precision;
delete [] lens_of_variables;
delete [] possible;
delete [] fitness;
_getch ();
return 0;
}
void cross(int* gen1, int* gen2, int* gen3, int len){//Одноточечное скре-
щивание
    bool sex = rand () % 2;
    int pos = 1 + rand () % (len - 2);
    switch (sex){
        case 0: {
            for (int i = 0; i < pos; i++){
                gen3 [i] = gen1 [i];
            }
            for (int i = pos; i < len; i++){
                gen 3 [i] = gen 2 [i];
            }
            break;
        }
        case 1: {
            for (int i = 0; i < pos; i++){
                gen 3 [i] = gen 2 [i];

```

```

        }
        for (int i = pos; i < len; i++){
            gen 3 [i] = gen 1 [i];
        }
    }
}
void cross_2 (int* gen1, int* gen2, int* gen3, int len) {//Двухточечное
скрещивание
    bool sex = rand () % 2; / Оператор случайного выбора одного из
двух потомков для записи в следующее поколение
    int pos_s = 1 + rand () % (len - 3);
    int pos_f = pos_s + 1 + rand () % (len - pos_s - 1);
    switch (sex){
        case 0: {
            for (int i = 0; i < pos_s; i++){
                gen 3 [i] = gen 2 [i];
            }
            for (int i = pos_s; i < pos_f; i++){
                gen 3 [i] = gen 1 [i];
            }
            for (int i = pos_f; i < len; i++){
                gen 3 [i] = gen 2 [i];
            }
            break;
        }
        case 1: {
            for (int i = 0; i < pos_s; i++){
                gen 3 [i] = gen 1 [i];
            }
            for (int i = pos_s; i < pos_f; i++){
                gen 3 [i] = gen 2 [i];
            }
            for (int i = pos_f; i < len; i++){
                gen 3 [i] = gen 1 [i];
            }
        }
    }
}
}

```

```

void mutation_(int* gen, int len, int type){ // Мутация
    float probability = 0;
    switch (type){
        case 0: {
            probability = (float)1/(3*len);
        }
        case 1: {
            probability = (float) 1/len;
        }
        case 2: {
            probability = (float)3/len;
            if(probability>1){
                probability = 1;
            }
        }
    }
    float p = 0;
    for (int i = 0; i < len; i++){
        p = (rand () % 100)*.01;
        if (p <= probability){
            switch (gen [i]){
                case 0: {
                    gen [i] = 1;
                    break;
                }
                case 1: {
                    gen [i] = 0;
                }
            }
        }
    }
}

int tour_sel (float* fitness, int popul_size, int size){//Турнирная селекция
    int* pool = new int[popul_size];
    for (int i = 0; i < popul_size; i++){
        pool [i] = i;
    }
    float* tour_popul = new float [size];

```

```

int* numbers = new int [size];
for (int i = 0; i < size; i++){
    int number = rand () % (popul_size - i);
    numbers [i] = pool [number];
    for (int j = number; j < popul_size - i - 1; j++){
        pool [j] = pool [j+1];
    }
    tour_popul [i] = fitness [numbers[i]];
}
int result = numbers [0];
float best = tour_popul[0];
for (int i = 1; i < size; i++){
    if (best < tour_popul [i]){
        result = numbers [i];
        best = tour_popul [i];
    }
}
delete [] tour_popul;
delete [] numbers;
delete [] pool;
return result;
}

int proportional_sel (float* fitness, int popul_size){//Пропорциональная
селекция
    float sum_fitness = 0;
    for (int i = 0; i < popul_size; i++){
        sum_fitness += fitness[i];
    }
    for (int i = 0; i < popul_size; i++){
        possible [i] = (float) fitness [i] / sum_fitness;
    }
    return 0;
}

int rank_sel (float* fitn, int popul_size){// Ранговая селекция
    bool check = 1;
    int* positions = new int [popul_size];
    for (int i = 0; i < popul_size; i++){
        positions[i] = i;
    }
}

```

```

while(check){
    check = 0;
    for (int i = 0; i < (popul_size -1); i++){
        float buff1 = 0, buff2 = 0;
        if (fitn [i] > fitn[i+1]){
            buff1 = fitn[i];
            fitn [i] = fitn[i+1];
            fitn [i+1] = buff1;
            buff 2 = positions[i];
            positions [i] = positions[i+1];
            positions [i+1] = buff2;
            check = 1;
        }
    }
}
float* ranks = new float[popul_size];
for (int i = 0; i < popul_size; i++){
    ranks [i] = i+1;
}
for (int i = 0; i < popul_size; i++){
    float sum = ranks [i];
    int num = 0, start = i;
    if (fitn[i] == fitn [i+1]){
        while (fitn [i] == fitn [i+1]){
            sum += ranks[i+1];
            num ++;
            i++;
            if (i == popul_size){
                break;
            }
        }
        num++;
        sum /=(float)num;
        for (int j = start; j <= i; j++){
            ranks [j] = sum;
        }
    }
}
float sum = 0;

```

```

    for (int i = 0; i < popul_size; i++){
        sum += ranks[i];
    }
    for (int i = 0; i < popul_size; i++){
        possible [positions [i]] = ranks [i] /sum;
    }
    delete [] ranks;
    delete [] positions;
    return 0;
}
int lucky (float* possible, int popul_size){//Оператор выбора индивида
на скрещивание
    float number = 0.001 * (rand () % 1000);
    float seek = possible [0];
    int position = 0;
    while (seek <= number){
        seek += possible [position];
        position++;
        if (position == popul_size-1){
            break;
        }
    };
    return position;
}
int genotype_len (float left, float right, float precision){
    float segment = (right - left)/precision;
    int check = 0;
    int len = 0;
    while (check < segment){
        len++;
        check = pow ((float) 2, len);
    }
    return len;
}
double bin_to_dec(int* bin, int len){
    double result = 0;
    for (int i = 0; i < len; i++){
        result += bin[i] * pow((double)2,(len-i-1));
    }
}

```



```

        return result;
    }

bool test_segment (float point, float left, float right){
    bool result = 0;
    if ((point >= left) && (point <= right)){
        result = 1;
    }
    return result;
}

int fitness_filling(int popul_size, float* functional, bool flag) { // Вычис-
ление функции пригодности
    float max = functional [0], min = functional [0];
    for (int i = 1; i < popul_size; i++){
        if (max < functional [i]){
            max = functional [i];
        } else if (min > functional [i]){
            min = functional [i];
        }
    }
    if (min != max){
        if (flag){
            for (int i = 0; i < popul_size; i++){
                fitness [i] = (functional [i] - min)/(max - min);
            }
        } else {
            for (int i = 0; i < popul_size; i++){
                fitness [i] = (max - functional [i])/(max - min);
            }
        }
    } else {
        for (int i = 0; i < popul_size; i++){
            fitness [i] = 1;
        }
    }
    return 0;
}

int grey_decode( int*& line, int len){
    int* buff_line = new int [len];

```

```

    for(int i = 0; i < len; i++){
        buff_line [i] = line [i];
    }
    for (int i = 0; i < len; i++){
        for (int j = i-1; j >= 0; j--){
            line [i] = xor (line [i], buff_line [j]);
        }
    }
    delete [] buff_line;
    return 0;
}
int xor (int a, int b){
    if (a == b){
        return 0;
    } else {
        return 1;
    }
}
double func_laplace(double a, double precision){
    bool flag = 0;
    if (a < 0){
        a *= -1;
        flag = 1;
    }
    double result = 0;
    if (a < 5){
        for (double i = 0; i < a; i+=precision){
            result += precision*fabs(pow(M_E,-.5*pow (i,2)) + pow
(M_E,-.5* pow((i+precision), 2)))/2.0;
        }
        result *= 1.0/pow(2*M_PI,.5);
    } else {
        result = .5;
    }
    if (flag){
        result *= -1;
    }
    return result;
}

```

```

double Ne(int n_x, int n_nom, int n_min, double M_nom, double M_k,
double k, double vm){
    double sigma = vm * M_k;
    double t_nom = (M_nom - M_k)/sigma;
    double phi = 1.0/sqrt(2 * M_PI) * pow(M_E, -.5 * pow(t_nom,2));
    double M_max = M_nom * k;
    double A1 = n_x;
    double A2 = n_nom + (double) (n_nom - n_min)/(k - 1);
    double B1 = (double) (n_nom - n_x)/M_nom;
    double B2 = (double) (n_min - n_nom)/(M_max - M_nom);
    double a = A1 + A2;
    double a1 = A2 - A1;
    double b = B1 + B2;
    double b1 = B2 - B1;
    double result = (double)1/9550 * (.5 * (a*M_k + b*pow(M_k,2) +
b*pow(sigma,2)) - (a1*M_k + b1*pow(M_k,2) + b1*pow(sigma,2)) *
func_laplace(t_nom,.0001) + b1 * phi * M_k * sigma);
    return result;
}

double Gt(double Gt_x, double Gt_nom, int n_min, double M_nom,
double M_k, double k, double vm,double c, double tetta_e){
    double sigma = vm * M_k;
    double t_nom = M_nom - M_k/sigma;
    double phi = 1.0/sqrt(2 * M_PI) * pow(M_E, -.5 * pow(t_nom,2));
    double M_max = M_nom * k;
    int Q_nom = 42500;
    double Ne_max = (double)1.0/c * M_max * n_min;
    double Gt_0 = (double)(Ne_max * 1000)/(Q_nom * tetta_e);
    double A1 = Gt_x;
    double A2 = Gt_nom + (double)((Gt_nom - Gt_0)/(k - 1));
    double B1 = (Gt_nom - Gt_x)/M_nom;
    double B2 = -1.0 * (Gt_nom - Gt_0)/ (M_nom * (double)(k - 1));
    double a = A1 + A2;
    double a1 = A2 - A1;
    double b = B1 + B2;
    double b1 = B2 - B1;
    double result = .5 * (a + b * M_k) - (a1 + b1*M_k) *
func_laplace(t_nom,.0001) + b1 * phi * sigma;
    return result;
}

```

```

}
double fine_function(double functional, float** segments, double* point,
int numb_of_variables, int gener, int sigma){
    for (int i = 0; i < numb_of_variables; i++){
        if(point[i] < segments[i][0]){
            functional = functional + sigma * pow (.5 * gener,2) *
pow (segments [i] [0] – point [0],2);
        }
        if(point[i] > segments [i] [1]){
            functional = functional + sigma * pow(.5 * gener,2) *
pow(point[1] - segments[i][1],2);
        }
    }
    return functional;
}

```

5.3. Программное средство для расчета оптимальных параметров характеристик двигателя и трактора с учетом минимума энергозатрат на основе многокритериального генетического алгоритма

```

#include <iostream>
#include <cstdlib>
#include <stdlib.h>
#include <conio.h>
#include <time.h>
#include <fstream>
using namespace std;
#define _USE_MATH_DEFINES
#include <math.h>

void cross (int*, int*, int*, int);
void cross_2 (int*, int*, int*, int);
void mutation_(int*, int, int);
int tour_sel (float*, int, int);
int proportional_sel (float*, int);
int rank_sel (float*, int);
int lucky (float*, int);
int genotype_len (float, float, float);

```

```

double bin_to_dec (int*, int);
int dec_to_bin (int, int*, int);
bool test_segment (float, float, float);
int fitness_filling (int, float*, bool);
int grey_encode (int*, int);
int grey_decode (int*, int);
int xor(int, int);
double func_laplace (double, double);
double Ne (int, int, int, double, double, double, double);
double Gt (double, double, int, double, double, double, double, double);
float* possible;
float* fitness;
int main (){
    srand(time(NULL));
    setlocale (0, "");
    int popul_size = 0; // Размер популяции
    int len = 0; // Длина гена
    int itr = 0; // Поколение
    int find_itr = 0; // Поколение, в котором найдено лучшее решение
    int mut = 0; // Вероятность мутации, (%)
    int repeat = 0; // Прогон алгоритма
    int numb_of_variables = 10; // Число переменных оптимизируемой
функции
    double* precision = new double[numb_of_variables]; //Массив с
точностью переменных
    float** segments = new float*[numb_of_variables]; //Массив с гра-
ницами переменных
    //-----
    // Заполнение массивов границ и точности
    //-----
    cout << "ВВОД ПАРАМЕТРОВ ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ" << endl
<< endl;
    for (int i = 0; i < numb_of_variables; i++){
        segments[i] = new float[2];
        cout << "Введите левую границу интервала " << i << ": ";
        cin >> segments [i][0];
        cout << "Введите правую границу интервала " << i << ": ";
        cin >> segments[i][1];
        cout << "Введите точность переменной " << i << ": ";

```

```

        cin >> precision[i];
        cout << endl;
    }
    int* lens_of_variables = new int[numb_of_variables]; // Массив с
длинами каждой переменной в бинарном виде
    //-----
    // Вычисление длин переменных в бинарном виде
    //-----
    for (int i = 0; i < numb_of_variables; i++){
        lens_of_variables [i] = genotype_len (segments [i] [0], seg-
ments [i][1], precision [i]);
        len += lens_of_variables[i];
    }
    //-----
    //Ввод значений пользователем
    //-----
    cout << endl << "НАСТРОЙКА ПАРАМЕТРОВ ГЕНЕТИЧЕ-
СКОГО АЛГОРИТМА" << endl << endl;
    cout << "Введите размер популяции: ";
    cin >> popul_size;
    cout << "Введите число поколений: ";
    cin >> itr;
    cout << "Введите тип мутации: ";
    cin >> mut;
    cout << "Введите количество прогонов: ";
    cin >> repeat;
    cout << endl << "ПОИСК ОПТИМАЛЬНОГО РЕШЕНИЯ" <<
endl << endl;
    possible = new float[popul_size]; // Массив вероятностей быть
отобранным к скрещиванию для каждого индивида популяции
    fitness = new float[popul_size]; // Массив значений функции при-
годности для каждого индивида
    int mismatch = 0, find_gen = 0;
    //-----
    //Начало алгоритма
    //-----
    for (int rep = 0; rep < repeat; rep++){
        //-----
        // Инициализируем популяцию случайными значениями

```

```

//-----
int** population = new int*[popul_size];
for (int i = 0; i < popul_size; i++){
    population[i] = new int[len];
    possible[i] = 0;
    fitness[i] = 0;
    for (int j = 0; j < len; j++){
        population[i][j] = rand()%2;
    }
}
float** functional = new float*[2]; // Массив значений функ-
ции для каждого индивида
for (int i = 0; i < 2; i++){
    functional[i] = new float [popul_size];
}
int* superman = new int[len]; // Лучший индивид в популя-
ции

float* best = new float[2]; // Лучшее значение функции
best[0] = 1000000;
best[1] = -1000000;
double* best_pos = new double[numb_of_variables]; // Значе-
ния переменных с лучшим значением функции
for (int i = 0; i < numb_of_variables; i++){
    best_pos[i] = 0;
}
find_itr = 0;
int choose = 0;
int doom = 0;
for (int gener = 0; gener < itr; gener++){
    //-----
    // Инициализация в заданных пределах половины по-
пуляции

    // Случайными индивидами в случае долгого
    // Отсутствия улучшения целевой функции
    // -----
    if (doom > itr/4){
        doom = 0;
        for (int i = 0; i < popul_size/2; i++){
            int left_limit = 0; // Левая граница переменной в строке

```

```

        int right_limit = 0; // Правая граница переменной в строке
        for (int j = 0; j < numb_of_variables; j++){

            right_limit += lens_of_variables[j]; // Устанавливаем правую гра-
            ницу
            int segment = (double) (segments [j][1] - segments[j] [0])/precision [j]; //
            вычисляем мощность пространства поиска
            int* genotype_of_one_var = new int[lens_of_variables[j]]; // Временный
            массив хранящий строку для одной переменной
            segment = rand () % (segment + 1); // Случайное значение пере-
           менной
            dec_to_bin(segment,genotype_of_one_var, lens_of_variables[j]); // Пере-
            вод в двоичный вид из десятичного
            grey_encode (genotype_of_one_var,lens_of_variables[j]); // Перевод в
            бинарный рефлексивный код Грея
            for (int k = left_limit; k < right_limit; k++){
                population [i][k] = genotype_of_one_var[k - left_limit]; // Запись значе-
                ния в генотип
            }

            left_limit += lens_of_variables[j]; // Перемещение левой границы
            delete [] genotype_of_one_var;
        }
    }

    for (int i = 0; i < popul_size; i++){
        int left_limit = 0; // Левая граница переменной в строке
        int right_limit = 0; // Правая граница переменной в строке
        double* point = new double[numb_of_variables]; // Массив, храня-
        щий значение координат в десятичном виде
        //-----
        // Расшифровка генотипа
        //-----
        for (int j = 0; j < numb_of_variables; j++){
            point[j]=0; // Значение переменной
            right_limit += lens_of_variables[j]; // Вычисляем правую границу
            int* genotype_of_one_var = new int[lens_of_variables[j]]; // Созда-
            ем массив одной переменной в двоичном виде
            for (int n = left_limit; n < right_limit; n++){

```



```

        genotype_of_one_var[n - left_limit] = population[i][n]; // Заполняем
массив значениями из основного генотипа
    }
    grey_decode(genotype_of_one_var, lens_of_variables[j]); // Переводим из
рефлексивного кода Грея в двоичную форму
    left_limit += lens_of_variables[j]; // Перемещаем левую границу
для следующей переменной point[j] = segments[j][0] +
(double)bin_to_dec(genotype_of_one_var, lens_of_variables[j])*precision
[j]; // Находим значение точки в десятичном виде
    delete[] genotype_of_one_var; // Удаляем массив кода одной пе-
ременной
    }
    bool out_of_segment = 0; // Флаг выхода за границы области по-
иска
    //-----
    // Проверка на нахождение точки в заданной области
    //-----
    for (int j = 0; j < numb_of_variables; j++){
        if (!test_segment(point[j], segments[j][0], segments [j] [1])) { // Зна-
чение выходит за границы
            out_of_segment = 1;
            functional [0] [i] = 1000;
            functional [1] [i] = -1000;
            break;
        }
    }
    if (!out_of_segment){ // Значение в заданных пределах
functional [0] [i] = Gt (point [7], point [8], point [1], point [3], point [4],
point [5], point [6], point [9]); // Вычисление значения целевой функ-
ции functional [1] [i]= Ne (point [0], point [1], point [2], point [3], point
[4], point [5], point [6]);
    }
    //-----
    // Проверка: не является ли найденное решение лучшим
    //-----
    if (best [0] >= functional[0][i] && best[1] <= functional [1][i]){//
Если одно значение лучше и другое не хуже, чем было
        if (best[0] != functional [0][i] || best[1] != functional [1][i]){// Не за-
писано ли то же самое

```

```

best [0]=functional[0][i];
best [1]=functional[1][i];
for (int j = 0; j < numb_of_variables; j++){
best_pos [j] = point [j]; // Сохранение координат лучшей точки
}
find_itr = gener; // Записываем номер поколения
for (int s = 0; s < len; s++){
    superman[s] = population[i][s]; // Сохранение генотипа лучшей
очки
    }
    doom = 0;
    }
    }
delete[] point; // Удаление массива со значение координаты в десятичной
форме
    }
    int** inter_popul = new int*[popul_size]; // Создание промежуточной
популяции для взятия индивидов на генетические операции
    for (int i = 0; i < popul_size; i++){
        inter_popul[i] = new int[len];
    }

    //-----
    // Подпопуляция для Gt
    //-----
fitness_filling (popul_size,functional [0],0); // Вычисление функции
пригодности
    proportional_sel (fitness,popul_size);
    int razdel = popul_size/2;
    for (int i = 0; i < razdel; i++){
        for (int j = 0; j < len; j++){
            inter_popul [i][j] = population [lucky (possible, popul_size)] [j];
        }
    }

    //-----
    // Подпопуляция для Ne
    //-----
fitness_filling(popul_size,functional[1],1); // Вычисление функции при-
годности
    proportional_sel (fitness,popul_size);

```

```

for (int i = razdel; i < popul_size; i++){
for (int j = 0; j < len; j++){
inter_popul [i][j] = population[lucky (possible, popul_size)] [j];
}
}
int* positions = new int [popul_size];
for (int i = 0; i < popul_size; i++){
positions [i] = i;
}
//-----
// Перемешивание промежуточной популяции
//-----
for(int i = 0; i < 1000; i++){
    int buff = 0;
    int number 1 = 0, number 2 = 0;
    number 1 = rand () % popul_size;
    do {
        number 2 = rand () % popul_size;
    } while(number 1 == number 2);
    buff = positions [number 1];
    positions [number 1] = positions [number 2];
    positions [number 2] = buff;
}
//-----
//Скрещивание
//-----
for (int i = 0; i < popul_size - 1; i++){
    cross_2 (inter_popul [positions [rand () % popul_size]], inter_popul
[positions [rand () % popul_size]], population [i], len);
}
for (int i = 0; i < len; i++){
    population[popul_size - 1][i] = superman[i]; // Прямое копирование
лучшего индивида в следующее поколение
}
for (int i = 0; i < popul_size; i++){
    mutation_(population[i], len, mut); // Оператор мутации
}
for (int i = 0; i < popul_size; i++){

```

```

delete [] inter_popul[i]; // Истребление промежуточной популяции

    }
    delete[] inter_popul;
    doom++;
    cout << "/ r Поколение: " << gener +1 << " Ne = " << best [1] << ";
Gt = " << best [0];
    }
    cout << "/ r                                     ";
cout << endl << "Прогон #" << rep + 1 << endl;
cou<< "Лучшая точка (" << best_pos [0] << "," << best_pos [1] << "," <<
best_pos [2] << "," << best_pos [3] << "," << best_pos [4] << "," <<
best_pos [5] << "," << best_pos [6] << "," << best_pos [7] <<"," <<
best_pos [8] <<"," << best_pos [9] << ")," << endl << "значение функ-
ции Ne = " << Ne (best_pos [0], best_pos [1], best_pos [2], best_pos [3],
best_pos [4], best_pos [5], best_pos [6]) << ", Gt = " << Gt (best_pos [7],
best_pos [8], best_pos [1], best_pos [3], best_pos [4], best_pos [5],
best_pos [6], best_pos [9]) << " найдена в " << find_itr << " поколении."
<< endl << endl;
    for (int i = 0; i < popul_size; i++){
        delete [] population [i];
    }
delete [] population;
delete [] superman;
for (int i = 0; i < 2; i++){
    delete [] functional [i];
}
delete [] functional;
delete [] best_pos;
delete [] best;
}
for (int i = 0; i < numb_of_variables; i++){
    delete [] segments [i];
}
delete [] segments;
delete [] precision;
delete [] lens_of_variables;
delete [] possible;
delete [] fitness;

```

```

_getch ();
return 0;
}
void cross (int*& gen1, int*& gen2, int*& gen3, int len){ // Одноточечное скрещивание
bool sex = rand () % 2;
int pos = 1 + rand () % (len - 2);
switch (sex){
    case 0: {
        for(int i = 0; i < pos; i++){
            gen3 [i] = gen1[i];
        }
        for(int i = pos; i < len; i++){
            gen3 [i] = gen2 [i];
        }
        break;
    }
    case 1: {
        for (int i = 0; i < pos; i++){
            gen3 [i] = gen2 [i];
        }
        for (int i = pos; i < len; i++){
            gen3 [i] = gen1 [i];
        }
    }
}
}
void cross_2(int* gen1, int* gen2, int* gen3, int len){//Двухточечное скрещивание
bool sex = rand () % 2; // Выбор какой из потомков будет выбран в качестве нового индивида
int pos_s = 1 + rand () % (len - 3);
int pos_f = pos_s + 1 + rand () % (len - pos_s - 1);
switch (sex){
    case 0: {
        for (int i = 0; i < pos_s; i++){
            gen3 [i] = gen2 [i];
        }
        for(int i = pos_s; i < pos_f; i++){

```

```

        gen 3 [i] = gen 1 [i];
    }
    for (int i = pos_f; i < len; i++){
        gen 3 [i] = gen 2 [i];
    }
    break;
}
case 1: {
    for (int i = 0; i < pos_s; i++){
        gen 3 [i] = gen 1 [i];
    }
    for (int i = pos_s; i < pos_f; i++){
        gen 3 [i] = gen 2 [i];
    }
    for (int i = pos_f; i < len; i++){
        gen 3 [i] = gen 1 [i];
    }
}
}
}
void mutation_(int* gen, int len, int type) { // Мутация по стандарту
    float probability = 0;
    switch (type){
        case 0: {
            probability = (float) 1 / (3*len);
        }
        case 1: {
            probability = (float) 1/len;
        }
        case 2: {
            probability = (float) 3/len;
            if(probability>1){
                probability = 1;
            }
        }
    }
    float p = 0;
    for (int i = 0; i < len; i++){

```

```

    p = (rand () % 100)*.01;
    if (p <= probability){
        switch (gen [i] ){
            case 0: {
                gen [i] = 1;
                break;
            }
            case 1: {
                gen [i] = 0;
            }
        }
    }
}

int tour_sel (float* fitness, int popul_size, int size){ // Турнирная селек-
ция
    int* pool = new int[popul_size];
    for (int i = 0; i < popul_size; i++){
        pool [i] = i;
    }
    float* tour_popul = new float [size];
    int* numbers = new int [size];
    for (int i = 0; i < size; i++){
        int number = rand () % (popul_size - i);
        numbers[i] = pool [number];
        for (int j = number; j < popul_size - i - 1; j++){
            pool [j] = pool [j+1];
        }
        tour_popul [i] = fitness[numbers [i]];
    }
    int result = numbers [0];
    float best = tour_popul [0];
    for (int i = 1; i < size; i++){
        if (best < tour_popul [i]){
            result = numbers [i];
            best = tour_popul [i];
        }
    }
    delete [] tour_popul;
    delete [] numbers;
}

```

```

        delete [] pool;
        return result;
    }
int proportional_sel (float* fitness, int popul_size){ // Пропорциональная
селекция
    float sum_fitness = 0;
    for (int i = 0; i < popul_size; i++){
        sum_fitness += fitness [i];
    }
    for (int i = 0; i < popul_size; i++){
        possible [i] = (float)fitness [i] /sum_fitness;
    }
    return 0;
}
int rank_sel (float* fitn, int popul_size){
    bool check = 1;
    int* positions = new int[popul_size];
    for (int i = 0; i < popul_size; i++){
        positions [i] = i;
    }
    while (check){
        check = 0;
        for (int i = 0; i < (popul_size -1); i++){
            float buff1 = 0, buff2 = 0;
            if (fitn [i] > fitn [i+1]){
                buff1 = fitn [i];
                fitn [i] = fitn [i+1];
                fitn [i+1] = buff1;
                buff 2 = positions[i];
                positions [i] = positions [i+1];
                positions [i+1] = buff 2;
                check = 1;
            }
        }
    }
    float* ranks = new float[popul_size];
    for (int i = 0; i < popul_size; i++){
        ranks [i] = i+1;
    }
    for (int i = 0; i < popul_size; i++){

```



```

float sum = ranks [i];
int num = 0, start = i;
if (fitn [i] == fitn [i+1]){
    while (fitn[i] == fitn [i+1]){
        sum += ranks [i+1];
        num++;
        i++;
        if (i == popul_size){
            break;
        }
    }
    num++;
    sum /=(float) num;
    for (int j = start; j <= i; j++){
        ranks [j] = sum;
    }
}
}
float sum = 0;
for (int i = 0; i < popul_size; i++){
    sum += ranks[i];
}
for (int i = 0; i < popul_size; i++){
    possible [positions [i]] = ranks [i] /sum;
}
delete [] ranks;
delete [] positions;
return 0;
}
int lucky (float* possible, int popul_size){ // Функция отбора индивида
на скрещивание
    float number = 0.001 * (rand () % 1000);
    float seek = possible [0];
    int position = 0;
    while (seek <= number){
        seek += possible[position];
        position++;
        if (position == popul_size-1){
            break;
        }
    }
}

```

```

    }
    return position;
}

int genotype_len(float left, float right, float precision){
    float segment = (right - left)/precision;
    int check = 0;
    int len = 1;
    if(segment > 1){
        while (check <= segment){
            len++;
            check = pow((float)2,len);
        }
    }
    return len;
}

double bin_to_dec(int* bin, int len){
    double result = 0;
    for (int i = 0; i < len; i++){
        result += bin [i] * pow ((double)2, (len - i - 1));
    }
    return result;
}

int dec_to_bin (int dec, int* line, int len){
    int buff = dec;
    for (int i = 0; i < len; i++){
        buff = dec / 2;
        line[len - i - 1] = dec-buff * 2;
        dec = buff;
    }
    return 0;
}

bool test_segment(float point, float left, float right){
    bool result = 0;
    if ((point >= left) && (point <= right)){
        result = 1;
    }
    return result;
}

```

```

int fitness_filling(int popul_size, float* functional, bool flag){ // Вычис-
ление функции пригодности
    float max = functional [0], min = functional [0];
    for (int i = 1; i < popul_size; i++){
        if (max < functional [i]) {
            max = functional [i];
        } else if (min > functional [i]){
            min = functional [i];
        }
    }
    if (min != max){
        if (flag){
            for (int i = 0; i < popul_size; i++){
                fitness [i] = (functional [i] - min)/(max - min);
            }
        } else {
            for (int i = 0; i < popul_size; i++){
                fitness [i] = (max - functional [i] )/(max-min);
            }
        }
    } else {
        for (int i = 0; i < popul_size; i++){
            fitness [i] = 1;
        }
    }
    return 0;
}

int grey_encode (int* line, int len){
    int* buff_line = new int [len];
    for (int i = 0; i < len; i++){
        buff_line [i] = line [i];
    }
    for (int i = 1; i < len; i++){
        line [i] = xor (line [i], buff_line[i - 1]);
    }
    delete [] buff_line;
    return 0;
}

int grey_decode (int* line, int len){
    int* buff_line = new int [len];

```

```

    for (int i = 0; i < len; i++){
        buff_line[i] = line [i];
    }
    for (int i = 0; i < len; i++){
        for (int j = i-1; j >= 0; j--){
            line [i] = xor(line [i],buff_line [j]);
        }
    }
    delete[] buff_line;
    return 0;
}
int xor (int a, int b){
    if (a == b){
        return 0;
    } else {
        return 1;
    }
}
double func_laplace(double a, double precision){
    bool flag = 0;
    if (a < 0){
        a *= -1;
        flag = 1;
    }
    double result = 0;
    if (a < 5){
        for (double i = 0; i < a; i+=precision){
            result += precision*fabs(pow(M_E,-.5*pow (i,2)) + pow
(M_E,-.5*pow ((i+precision), 2)))/2.0;
        }
        result *= 1.0 / pow (2*M_PI, .5);
    } else {
        result = .5;
    }
    if (flag){
        result *= -1;
    }
    return result;
}

```

```

double Ne(int n_x, int n_nom, int n_min, double M_nom, double M_k,
double k, double vm){
    double sigma = vm * M_k;
    double t_nom = (M_nom - M_k)/sigma;
    double phi = 1.0/sqrt(2 * M_PI) * pow(M_E, -.5 * pow(t_nom,2));
    double M_max = M_nom * k;
    double A1 = n_x;
    double A2 = n_nom + (double)(n_nom - n_min)/(k - 1);
    double B1 = (double)(n_nom - n_x)/M_nom;
    double B2 = (double)(n_min - n_nom)/(M_max - M_nom);
    double a = A1 + A2;
    double a1 = A2 - A1;
    double b = B1 + B2;
    double b1 = B2 - B1;
    double result = (double)1/9550 * (.5 * (a*M_k + b*pow(M_k,2) +
b*pow(sigma,2)) - (a1*M_k + b1*pow(M_k,2) + b1*pow(sigma,2)) *
func_laplace(t_nom,.0001) + b1 * phi * M_k * sigma);
    return result;
}

double Gt(double Gt_x, double Gt_nom, int n_min, double M_nom,
double M_k, double k, double vm, double k_ob){
    double sigma = vm * M_k;
    double t_nom = (M_nom - M_k)/sigma;
    double phi = 1.0/sqrt(2 * M_PI) * pow(M_E, -.5 * pow(t_nom,2));
    double M_max = M_nom * k;
    int Q_nom = 42500;
    double Ne_max = (double)(1.0/9550) * M_max * n_min;
    double Gt_0 = (double)(1.1 * Gt_nom * k)/k_ob;
    double A1 = Gt_x;
    double A2 = Gt_nom + (double)((Gt_nom - Gt_0)/(k - 1));
    double B1 = (Gt_nom - Gt_x)/M_nom;
    double B2 = -1.0 * (Gt_nom - Gt_0)/ (M_nom * (double)(k - 1));
    double a = A1 + A2;
    double a1 = A2 - A1;
    double b = B1 + B2;
    double b1 = B2 - B1;
    double result = .5 * (a + b * M_k) - (a1 + b1*M_k) * func_laplace
(t_nom,.0001) + b1 * phi * sigma;
    return result;
}

```

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, в рамках которых применяется моделирование процессов на основе природной эволюции.

В данной монографии представлена методика многокритериальной оптимизации энергоматериальных затрат на режиме рабочего хода МТА с использованием генетических алгоритмов.

Энергозатраты при работе агрегатов на режиме рабочего хода в процессе 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.

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

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 двух 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. При определении взаимосвязи входных воздействий на агрегат с его выходными характеристиками был использован известный метод функций случайных аргументов.

Для решения поставленной задачи был адаптирован многокритериальный генетический алгоритм VEGA, который используется для нахождения оптимальных значений целевых функций, определяющих связь между вероятностными входными воздействиями на агрегаты его выходными параметрами.

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.

Предложенный многокритериальный алгоритм решения задачи оптимизации параметров и режимов функционирования МТА позволяет с высокой эффективностью обосновывать рациональные эксплуатационные режимы и характеристики мобильных сельскохозяйственных агрегатов.

В соответствии с поставленной целью в монографии решены следующие взаимосвязанные задачи, представляющие научную новизну полученных результатов:

разработана методика определения оптимальных параметров и режимов работы МТА с использованием комплексного критерия по уровню энергетических затрат при использовании мобильных сель-

скохозяйственных агрегатов с тракторами различного уровня мощности (данная методика основана на системном анализе проблемы);

предложен к использованию комплексный критерий оптимизации энергетических и технико-экономических параметров работы МТА на основе двух составляющих энергозатрат технологического процесса:

а) минимум потерь урожая, обусловленных увеличением агросроков выполнения технологических операций возделывания сельскохозяйственных культур по причине снижения мощности двигателя трактора под воздействием переменных внешних факторов;

б) снижение уровня энергозатрат, обусловленных повышением расхода топлива при вероятностном характере внешней нагрузки, за счет использования оптимальных нагрузочных и скоростных режимов работы двигателя;

разработаны алгоритмы и программы, позволяющие с помощью ЭВМ определить оптимальные параметры и режимы работы МТА различных классов тяги и уровней мощности;

предложена методология обоснования оптимальных энергетических, топливно-экономических параметров и эксплуатационных режимов работы машинно-тракторных агрегатов с тракторами различных классов тяги и уровней мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев Л.Е. Основы расчета оптимальных и допускаемых режимов работы машинно-тракторных агрегатов / Л.Е. Агеев – Л.: Колос, 1978. – 256 с.
2. Агеев Л.Е. Проблемы и пути формирования энергосберегающих машинно-тракторных агрегатов / Л.Е. Агеев, В.Н. Сидоров. – Брянск: Изд-во БГСХА, 1999. – 92 с.
3. Агеев Л.Е. Средние и экстремальные значения технико-экономических показателей тягового и тягово-приводного агрегатов на базе трактора ДТ-175С с ГМТ / Л.Е. Агеев, А.М. Умирзоков, В.А. Эвиев. – Пушкин, 1989. – 28 с. – Деп. в ВНИИТЭИагропром 3.04.89. – №176.
4. Агеев Л.Е. Оценка качества технологических операций в растениеводстве / Л.Е. Агеев. – Л., 1983. – 15 с.
5. Агеев Л.Е. Сверхмощные тракторы сельскохозяйственного назначения / Л.Е. Агеев, В.С. Шкрабак, В.Ю. Моргулис-Якушев. – Л.: Агропромиздат, 1986. – 415 с.
6. Агеев Л.Е. Методология функционального диагностирования тракторов / Л.Е. Агеев, В.А. Эвиев // Тракторы и с.-х. машины. – 2004. – № 7. – С. 44–45.
7. Агеев Л.Е. Оценка энергетических затрат при оптимизации режимов работы МТА / Л.Е. Агеев, В.А. Эвиев // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей тракторов и автомобилей: сб. науч. тр. Междунар. науч.-техн. конф. – СПб.-Пушкин: Изд-во СПбГАУ, 2004. – С. 270–274.
8. Агеев Л.Е. Оценка энергетических параметров дизельных энергоустановок тракторов класса 3 / Л.Е. Агеев, В.А. Эвиев // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей, тракторов и автомобилей: сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. – СПб.-Пушкин: Изд-во СПбГАУ, 2003. – С. 74–77.
9. Агеев Л.Е. Прогнозирование энергозатрат при работе МТАУ / Л.Е. Агеев, В.А. Эвиев // Изв. Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – СПб.-Пушкин: Изд-во СПбГАУ, 2004. – №1. – С. 42–48.
10. Агеев Л.Е. Снижение энергозатрат при возделывании с.-х. культур за счет повышения эффективности использования МТА / Л.Е. Агеев, В.А. Эвиев // Повышение производительности и эффективности использования машинно-тракторного парка и автотранспорта: сб. науч. тр. – СПб.-Пушкин: Изд-во СПбГАУ, 2004. – С. 87–100.

11. Агеев Л.Е. Техническое обеспечение почвозащитных энерго-сберегающих технологий: учеб. пособие / Л.Е. Агеев, В.А. Эвиев. – СПб.-Пушкин: Изд-во СПбГАУ, 2005. – 145 с.
12. Агеев Л.Е. Эксплуатация энергонасыщенных тракторов / Л.Е. Агеев, С.Х. Бахриев. – М.: Агропромиздат, 1991. – 271 с.
13. Агеев Л.Е. Определение эксплуатационных показателей трактора по характеристике двигателя с участком постоянной мощности / Л.Е. Агеев, А.К. Бурм // Науч. тр. ЛСХИ. – Т. 402. – С. 58–63.
14. Агеев Л.Е. Оптимизация энергетических параметров МТА / Л.Е. Агеев, Н.И. Джабборов, В.А. Эвиев // Тракторы и с.-х. машины. – 2004. – №2. – С. 19–20.
15. А. с. 1064169. Устройство для определения эффективной мощности двигателя внутреннего сгорания / Л.Е. Агеев, П.Р. Пуговкин, Г.Н. Романов (СССР). – № 3462957; зарег. 01.09.1983.
16. Завалишин Ф.С. Методы исследований по механизации сельскохозяйственного производства / Ф.С. Завалишин, М.Г. Мацнев. – М.: Колос, 1982. – 231 с.
17. Агеев Л.Е. Мощностные показатели тягово-приводного агрегата при вероятностном характере воздействий / Л.Е. Агеев, А.Б. Ризоев // Зап. ЛСХИ. – Л., 1973. – Т. 215. – С. 55–59.
18. Агеев Л.Е. Оценка средних значений энергетических показателей силовой установки трактора ДТ-175С при вероятностной нагрузке / Л.Е. Агеев, В.В. Романов, В.А. Эвиев. – СПб.-Пушкин, 1989. – 24 с. – Деп. в ВНИИТЭИагропром 1.02.89. – №26.
19. А. с. Способ определения мощности дизельного двигателя / Л.Е. Агеев, А.П. Савельев, П.Р. Пуговкин (СССР). – №3276883; зарег. 07.01.83.
20. Агеев Л.Е. Тестовое диагностирование дизельного двигателя по функциональным параметрам при гармонически изменяющейся нагрузке / Л.Е. Агеев, А.П. Савельев, Г.Н. Романов // Науч. тр. ЛСХИ. – Л., 1981. – Т. 421. – С. 71–74.
21. Агеев Л.Е. Вероятностно-статистические характеристики машинно-тракторного агрегата / Л.Е. Агеев // Вопросы механизации с.х. нечерноземной зоны РСФСР. – Саранск, 1980. – С. 146–158.
22. Агеев Л.Е. Влияние скорости движения на основные эксплуатационные показатели работы машинно-тракторных агрегатов / Л.Е. Агеев // Зап. ЛСХИ, 1965. – Т. 97. – С. 117–124.
23. Агеев Л.Е. Затраты энергии тракторным агрегатом при работе на повышенных скоростях / Л.Е. Агеев // Механизация и электрификация социалистического с.х. – 1962. – № 5. – С. 50–51.

24. Агеев Л.Е. Расчет оптимальных режимов нагрузки мобильных агрегатов / Л.Е. Агеев // Механизация и электрификация социалистического с.х. – 1978. – № 1. – С. 31–35.
25. Агеев Л.Е. Эксплуатация энергонасыщенных тракторов / Л.Е. Агеев, С.Х. Бахриев. – М.: Агропромиздат, 1991. – 271 с.
26. Агеев Л.Е. Оценка регуляторных характеристик тракторных двигателей вероятностно-статистическими критериями / Л.Е. Агеев, А.К. Бурм // Науч. тр. ЛСХИ, 1978. – Т. 350. – С. 37–41.
27. Агеев Л.Е. Статистическая оценка эксплуатационных показателей работы машинно-тракторных агрегатов / Л.Е. Агеев, И.Н. Крячко // Зап. ЛСХИ. – Л., 1969. – Т. 140. – С. 36–43.
28. Агеев Л.Е. Мощностные показатели тягово-приводного агрегата при вероятностном характере внешних воздействий / Л.Е. Агеев, А.Б. Ризоев // Зап. ЛСХИ. – Л., 1973. – Т. 215. – С. 55–59.
29. Агеев Л.Е. Обоснование оптимальных параметров перспективных МТА / Л.Е. Агеев, М.К. Солиев // Науч. тр. ЛСХИ. – Л., 1977. – Т. 323. – С. 63–65.
30. Агеев Л.Е. Методика определения оптимальных нагрузочных режимов работы тракторов класса 30 кН / Л.Е. Агеев, Н.И. Шадрина // Науч. тр. ЛСХИ. – Л., 1977. – Т. 323. – С. 54–56.
31. Агеев Л.Е. Сверхмощные тракторы сельскохозяйственного назначения / Л.Е. Агеев, В.С. Шкрабак, В.Ю. Моргулис-Якушев. – Л.: Агропромиздат, 1986. – 415 с.
32. Агеев Л.Е. Расчет и оптимизация энергетических показателей тяговых с.-х. агрегатов / Л.Е. Агеев, Р.Х. Юсупов, В.А. Уртаев. – ВНИИТЭНагропром. – 1992. – № 5. – С 92–96.
33. Акимов В.В. Влияние частотных характеристик дизеля СМД-14Н на нагруженность силовой передачи трактора ТДТ-55 / В.В. Акимов, В.П. Антипин // Тракторы и с.-х. машины. – 1982. – № 10. – С. 15–17.
34. Анохин В.И. О работе силовой установки гусеничного с.-х. трактора с ГМТ в режиме максимальной топливной экономичности / В.И. Анохин, А.М. Нефедов // Тракторы и с.х. машины. – 1978. – №2. – С. 3–5.
35. Барский И.Б. Динамика трактора / И.Б. Барский, В.Я. Анилович, Г.М. Кутьков. – М.: Машиностроение, 1973. – 280 с.
36. Батищев Д.И., Исаев С.А. Оптимизация многоэкстремальных функций с помощью генетических алгоритмов: URL: <http://www.chat.ru/~saisa/index.html>.

37. Бахтин П.У. Физико-механические и технологические свойства почв / П.У. Бахтин. – М.: Знание, 1971. – 64с.
38. Болотин А.А. Исследование характера нагрузки на двигатель и отдельные механизмы силовой передачи / А.А. Болотин // Тр. Вологодского молочного института. – 1959. – Т. 42. – С. 3–49.
39. Болотин А.А. О характере нагрузки на двигатель и силовую передачу трактора // Тракторы и сельхозмашины. – 1959. – № 11. – С. 15–19.
40. Болтинский В.Н. Мощность тракторного двигателя при работе с неустановившейся нагрузкой / В.Н. Болтинский // Механизация и электрификация социалистического с.х. – 1959. – № 2. – С. 3–8. – № 4 – С. 13–16.
41. Болтинский В.Н. Работа тракторного двигателя при неустановившейся нагрузке / В.Н. Болтинский. – М.: Сельхозиздат, 1949. – 216 с.
42. Болтинский В.Н. Теория, конструкция и расчет тракторных и автомобильных двигателей / В.Н. Болтинский – М.: Сельхозиздат, 1962. – 391 с.
43. Борисов С.Г. Методика исследования эффективности установки гасителя крутильных колебаний на ведомых дисках муфт сцепления тракторов / С.Г. Борисов, С.А. Лапшин, В.А. Васильев // Тр. НАТИ. – 1971. – Вып. 210. – С. 16–27.
44. Бурм А.К. Исследование по обоснованию эксплуатационных требований к параметрам тракторных агрегатов, определяемых регуляторной характеристикой двигателя: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.К. Бурм. – Л., 1980. – 15 с.
45. Вайнруб В.И. Повышение эффективности использования энергонасыщенных тракторов в нечерноземной зоне / В.И. Вайнруб, М.Г. Догановский. – Л.: Колос, 1982.
46. Васильев А.В. Тензометрирование и его применение в исследованиях тракторов / А.В. Васильев, Д.М. Раппопорт. – М.: Машгиз, 1963. – 340 с.
47. Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
48. Вероятностный характер изменения тягового сопротивления / Л.С. Приходько, О.К. Шахбазов, П.Л. Щунак // Механизация и электрификация социалистического с.х. – 1971. – № 7. – С. 46–48.
49. Волков Б.Г. Общие методические указания к определению тягово-мощностных показателей тракторов в агрегатах / Б.Г. Волков // Тр. НИИМЭСХ, 1971. – Вып. 7. – С. 66–73.

50. Глотов С.В. Совершенствование системы контроля эксплуатационных параметров тракторов / С.В. Глотов // Тракторы и с.-х. машины. – 2004. – №5. – С. 25–26.
51. Глотов С.В. Оценка эффективности функционирования тракторов / С.В. Глотов. – Саранск: Красный Октябрь, 2003. – 188 с.
52. Голосовский С.И. Эффективность научных исследований / С.И. Голосовский. – М., 1969. – 135 с.
53. ГОСТ 18509-80. Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 58 с.
54. ГОСТ 20915-75. Сельскохозяйственная техника. Методы определения условий испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 34 с.
55. ГОСТ 24055-88 (ст. СЭВ 5628-86). Техника сельскохозяйственная. Методы эксплуатационно-технологической оценки. Общие положения. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 48 с.
56. ГОСТ 7057-81. Тракторы сельскохозяйственные. Методы испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 25 с.
57. ГОСТ II. 004-74 (ст. СЭВ 867-78). Прикладная статистика. Правила определения оценок и доверительных границ для параметров нормального распределения. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 20 с.
58. ГОСТ II. 006-74. Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 24 с.
59. Гуменникова А.П. Адаптивные поисковые алгоритмы для решения сложных задач многокритериальной оптимизации: дис. ... канд. техн. наук / А.П. Гуменникова. – Красноярск, 2006. – 129 с.
60. Гусятников В.А. Исследование работы двигателя Д-130 на неустановившемся режиме: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.А. Гусятников. – Л., 1977. – 25 с.
61. Давидсон Е.И. Моделирование системы почвообрабатывающих и посевных машин: учеб. пособие / Е.И. Давидсон. – Л.: Изд-во ЛСХИ, 1984. – 32 с.
62. Деличенко Е.М. Исследование энергетических параметров машинно-тракторных агрегатов при вероятностном характере нагрузки (на примере работы в Северо-Западной зоне): автореф. дис. ... канд. техн. наук / Е.М. Деличенко. – Л., 1970. – 22 с.
63. Джабборов Н.И. Научные основы энерготехнологической оценки и прогнозирования эффективности использования мобильных сельскохозяйственных агрегатов / Н.И. Джабборов. – Душанбе: До-ниш, 1995. – 286 с.

64. Джаббаров Н.И. Резервы повышения эффективности использования сельскохозяйственной техники / Н.И. Джаббаров, А.К. Кимсанов. – Душанбе: Матбуот, 2002. – 178 с.
65. Джаббаров Н.И. Определение эффективности использования техники по топливно-энергетическим затратам / Н.И. Джаббаров, В.А. Эвиев // Тракторы и с.х. машины. – 2005. – №4. – С. 26–28.
66. Джаббаров Н.И. Определение оптимальной нагрузки двигателя по удельному расходу топлива / Н.И. Джаббаров, В.А. Эвиев. – М., 1987. – 19 с. – Деп. в ВНИИТЭИагропром 04.05.87. – №285.
67. Джаббаров Н.И. Определение энергетических резервов сельскохозяйственных агрегатов при вероятностном характере внешней нагрузки / Н.И. Джаббаров, В.А. Эвиев // Современные методы ведения с.х. производства: тез. докл. XI науч.-практ. конф. – Калинин: Изд-во КСХИ, 1988. – С. 117.
68. Ждановский Н.С. Неустановившиеся режимы работы поршневых и газотурбинных двигателей автотракторного типа / Н.С. Ждановский. – Л.: Машиностроение, 1974. – 224 с.
69. Журавлев С.Ю. Влияние переменных внешних факторов на производительность машинно-тракторных агрегатов / С.Ю. Журавлев // Вестн. КрасГАУ. – 2011. – №7. – С. 148–153.
70. Журавлев С.Ю. Методика оценки влияния динамических характеристик моторно-трансмиссионной установки трактора на показатели работы мобильных с.х. агрегатов / С.Ю. Журавлев // Вестн. КрасГАУ. – 2011. – №8. – С. 135–141.
71. Журавлев С.Ю. Общие принципы теоретических исследований МТА и формирование его модели // Иновации в науке и образовании: мат-лы Всерос. оч.-заоч. науч.-практ. конф. Ч.2. – Красноярск, 2010. – С. 3–4.
72. Журавлев С.Ю. Определение оптимальных нагрузочных режимов машинно-тракторного агрегата (на примере трактора Т-170Б с двигателем Д-160) / С.Ю. Журавлев // Вестн. КрасГАУ. – 2003. – №3. – С. 151–153.
73. Журавлев С.Ю. Определение оптимальных скоростных режимов машинно-тракторного агрегата (на примере трактора Т-170Б с двигателем Д-160) // Вестн. КрасГАУ. – Красноярск, 2005. – №8. – С. 30–32.
74. Журавлев С.Ю. Оценка эффективности функционирования мобильных сельскохозяйственных агрегатов с использованием тяговой характеристики трактора // Вестн. КрасГАУ. – 2011. – №9. – С. 146–151.

75. Журавлев С.Ю. Повышение эффективности функционирования мобильных сельскохозяйственных машинно-тракторных агрегатов // Достижения науки и техники – развитию сибирских регионов: сб. докладов. – Красноярск, 1999. – С. 65–66.

76. Журавлев С.Ю. Повышение эффективности функционирования МТА за счет оптимизации эксплуатационных режимов и динамических характеристик моторно-трансмиссионной установки с механической ступенчатой трансмиссией на примере трактора Т-170Б: автореф. дис. ... канд. техн. наук / С.Ю. Журавлев. – СПб.-Пушкин, 1994. – 19 с.

77. Журавлев С.Ю. Структура энергетических затрат при использовании МТА // Иновации в науке и образовании: мат-лы Всерос. оч.-заоч. науч.-практ. конф. – Ч.2. – Красноярск, 2010. – С. 5–7.

78. Журавлев С.Ю. Применение генетического алгоритма при оптимизации функционирования сложных механических систем / С.Ю. Журавлев, В.А. Терсков // Вестн. КрасГАУ. – 2008. – №4. – С. 148–153.

79. Журавлев С.Ю. Определение эксплуатационных характеристик машинно-тракторного агрегата / С.Ю. Журавлев, А.Н. Арзаматов // Молодежь и наука – третье тысячелетие: сб. мат-лов межрегион. науч. фестиваля. – Красноярск, 2002. – С. 194.

80. Журавлев С.Ю. Формирование модели выбора оптимальных параметров и режимов работы машинно-тракторных агрегатов / С.Ю. Журавлев, В.Н. Котельников // Энергосберегающие технологии механизации с.х.: мат-лы Междунар. науч.-практ. конф. – Красноярск, 2011. – С. 7–9.

81. Журавлев С.Ю. Методика оценки влияния переменных внешних воздействий на МТА с учетом современных характеристик двигателя и трактора / С.Ю. Журавлев, С.А. Терских, В.Н. Котельников // Вестн. КрасГАУ. – 2009. – №11. – С. 156–159.

82. Журавлев С.Ю. Моделирование генетического алгоритма в задачах оптимизации сложных систем / С.Ю. Журавлев, С.А. Терских // Мат-лы Всерос. оч.-заоч. науч.-практ. конф. – Красноярск, 2008.

83. Журавлев С.Ю. Применение эволюционных методов для оптимизации функционирования сложных систем / С.Ю. Журавлев, В.А. Терсков // Мат-лы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения академика ВАСХНИЛ А.И. Селиванова. – Новосибирск, 2008. – С. 448–455.

84. Журавлев С.Ю., Терсков В.А. Формализация задачи выбора эффективной мощности моторно-трансмиссионной установки на стадии конструирования / С.Ю. Журавлев, В.А. Терсков // Мат-лы Междунар. заоч. конф. по проблемам агрокомплекса. – Красноярск, 2008.
85. Журавлев С.Ю. Повышение эффективности функционирования МТА за счет оптимизации динамических характеристик / С.Ю. Журавлев, Р.Х. Юсупов. – Деп. в ВНИИТЭИагропром № 65ВС-93. – 6 с.
86. Журавлев С.Ю. Учет влияния динамических характеристик трактора с МСТ на энергетические показатели МТА / С.Ю. Журавлев, Р.Х. Юсупов // Сб. науч. тр. КраГАУ. – Красноярск, 1996. – С. 56–60.
87. Зажигаев Л.С. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента / Л.С. Зажигаев, А.А. Китьян, Ю.И. Романиков – М.: Атомиздат, 1978. – 232 с.
88. Зангиев А.А. Комплектование ресурсосберегающих машинно-тракторных агрегатов. – М.: МИИСП, 1991. – 96 с.
89. Зангиев А.А. Оптимизация состава и режимов работы машинно-тракторных агрегатов по критериям ресурсосбережения: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / А.А. Зангиев. – М.: МИИСП, 1988. – 34 с.
90. Зангиев А.А. Производственная эксплуатация машинно-тракторного парка / А.А. Зангиев, Г.Л. Лышко, А.Н. Скороходов. – М.: Колос, 1996. – 320 с.
91. Зангиев А.А. Эксплуатация машинно-тракторного парка / А.А. Зангиев, А.В. Шпилько, А.Г. Левшин. – М.: Колосс, 2003. – 320 с.
92. Иофинов С.А. Влияние вероятностного характера нагрузки на средние значения показателей работы машинно-тракторных агрегатов // Вестн. с.-х. науки. – 1968. – №12. – С. 73–78.
93. Иофинов С.А. Средние значения энергетических показателей работы машинно-тракторного агрегата при вероятностном характере нагрузки / С.А. Иофинов, Л.Е. Агеев, Е.М. Демченко // Зап. ЛСХИ. – 1969. – Т. 140. – Вып. 1. – С. 44–45.
94. Иофинов С.А. Определение оптимальных значений эксплуатационных параметров при вероятностном характере величин / С.А. Иофинов, Л.Е. Агеев, И.Н. Крячко // Зап. ЛСХИ. – Л.-Пушкин, 1971. – Т. 164. – Вып. 1. – С. 13–16.
95. Иофинов С.А. Об оптимальной степени загрузки тракторного двигателя / С.А. Иофинов, Л.В. Линнах // Механизация и электрификация с.х.: зап. ЛСХИ. – Л.: Колос, 1965. – Т. 97. – С. 108–116.

96. Иофинов С.А. Эксплуатация машинно-тракторного парка / С.А. Иофинов, Г.П. Лышко. – М.: Колос, 1984. – 351 с.
97. Иофинов С.А. Определение эксплуатационных параметров и показателей работы агрегатов при вероятностном характере исследуемых величин / С.А. Иофинов, Б.Л. Минуберг // Механизация и электрификация с.х. – 1971. – №12. – С. 42–46.
98. Исаев С.А. Популярно о генетических алгоритмах: URL: [//www.chat.ru/~saisa/index.html](http://www.chat.ru/~saisa/index.html).
99. Кацыгин В.В. Оптимальные режимы работы МТА / В.В. Кацыгин, Д.Д. Бракоренко, И.П. Мацкевич // Механизация и электрификация с.-х. – 1979. – №7. – С. 33–35.
100. Керимов М.А. Методология обеспечения технологической надежности и качества работы зерноуборочных комплексов с учетом вероятностных условий их функционирования (критерии оценки и методы принятия решений): автореф. дис. ... д-ра техн. наук / М.А. Керимов. – СПб.-Пушкин: Изд-во СПбГАУ, 1999. – 41 с.
101. Киртбая Ю.К. Исследование динамики тягового сопротивления сельскохозяйственных машин и орудий / Ю.К. Киртбая // Сельхозтехника. – 1952. – №12. – С. 7–14.
102. Киртбая Ю.К. Исследование составляющих тягового сопротивления сельскохозяйственных машин и орудий / Ю.К. Киртбая // Сельхозмашины. – 1953. – №11. – С. 10–14.
103. Киртбая Ю.К. Основы теории использования машин в сельском хозяйстве / Ю.К. Киртбая. – М.: Машгиз, 1957. – 278 с.
104. Киртбая Ю.К. Резервы в использовании машинно-тракторного парка / Ю.К. Киртбая. – М.: Сельхозгиз, 1952.
105. Ковальчук Ю.К. Прогрессивные механизированные технологические процессы, основные параметры, режимы работы зерно-кормовых комплексов для послеуборочной обработки семян, фуражного зерна и кормов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Ю.К. Ковальчук. – СПб.-Пушкин: Изд-во СПбГАУ, 1993. – 40 с.
106. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1984. – 832 с.
107. Коробейников А.Т. Испытания сельскохозяйственных тракторов / А.Т. Коробейников, В.С. Лихачев, В.Ф. Шолохов. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.
108. Кравцов А.В. Электрические измерения / А.В. Кравцов. – М.: Агропромиздат, 1988. – 239 с.

109. Красовских В.С. Основы расчета параметров и режимов работы машинно-тракторных агрегатов: учеб. пособие / В.С. Красовских. – Барнаул: Изд-во Алтайского СХИ, 1982. – 56 с.
110. Крячко И.Н. Исследование эксплуатационных показателей и обоснование оптимальных режимов работы машинно-тракторных агрегатов при вероятностном характере нагрузки: автореф. дис. ... канд. техн. наук / И.Н. Крячко. – Л., 1971. – 18 с.
111. Кутьков Г.М. Основы теории трактора и автомобиля / Г.М. Кутьков. – М.: Изд-во МГАУ, 1995. – 275 с.
112. Кутьков Г.М. Тракторы и автомобили. Теория и технологические свойства. – М.: Колос, 2004. – 504 с.
113. Кутьков Г.М. Тяговая динамика тракторов / Г.М. Кутьков. – М.: Машиностроение, 1980. – 215 с.
114. Ларин Н.С. Оценка энергетических свойств тракторов и режимов их работы при гармонической и вероятностной нагрузках: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Н.С. Ларин. – Л., 1984. – 16 с.
115. Лурье А.Б. Основы теории управления сельскохозяйственными агрегатами / А.Б. Лурье // Зап. ЛСХИ: сб. науч. тр. – Т. 155. – Л.-Пушкин, 1971. – С. 31–39.
116. Лурье А.Б. Развитие статистических методов исследования агрегатов и их систем управления / А.Б. Лурье // Механизация и электрификация социалистического с.-х. – 1971. – №3. – С. 60–62.
117. Лурье А.Б. Статическая динамика сельскохозяйственных агрегатов // А.Б. Лурье. – Л.: Колос, 1970. – 376 с.
118. Математическая статистика: учеб. / В.М. Иванова, В.Н. Калинина, Л.А. Нешумова [и др.]. – М.: Высш. шк., 1981. – 371 с.
119. Методика статической обработки эмпирических данных РТМ 44–62. – ВНИИМАШ, 1966. – 100 с.
120. Методика энергетического анализа технологических процессов в сельскохозяйственном производстве. – М.: РИО ВИМ, 1995. – 95 с.
121. Миндель Л.И. Исследование эксплуатационных показателей тягово-приводного агрегата при вероятностном характере нагрузки: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Л.И. Миндель. – Л.: Изд-во ЛСХИ, 1975. – 24 с.
122. Морозов А.Х. Основы теории скоростных режимов машинно-тракторных агрегатов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / А.Х. Морозов. – Волгоград: ВСН, 1972. – 35 с.
123. Морозов А.Х. Эксплуатация автоматических устройств мобильных с.х. агрегатов / А.Х. Морозов. – М.: Колос, 1973. – 214 с.

124. Наземные тягово-транспортные системы: энциклопедия: в 3 т. / под общ. ред. И.П. Ксеновича. – М.: Машиностроение, 2003. – 408 с.
125. Немец И. Практическое применение тензорезисторов / И. Немец. – М.: Энергия, 1970. – 144 с.
126. Панов И.М. Почвообрабатывающая техника: состояние и проблемы развития / И.М. Панов // Тракторы и с.-х. машины. – 2003. – № 11. – С. 9–11.
127. Попов В.Д. Проектирование адаптивных технологий заготовки кормов из трав: учеб. пособие / В.Д. Попов. – СПб.: Изд-во НИПТИМЭСХ, 1998. – 190 с.
128. Правила производства механизированных работ в полеводстве / сост. К.С. Орманджи. – М.: Россельхозиздат, 1983. – 285 с.
129. Проектирование технологических процессов в растениеводстве / Зангиев А.А. [и др.]. – М.: Изд-во МГАУ, 2004. – 96 с.
130. Прибытков П.Ф. Безотказность уборочных агрегатов и комплексов / П.Ф. Прибытков, В.Ф. Скробач. – Л.: Агропромиздат, 1987. – 207 с.
131. Растрингин Л.А. Адаптация сложных систем / Л.А. Растрингин. – Рига: Зинатне, 1981. – 375 с.
132. Ризоев А.Б. Исследование и обоснование эксплуатационных допусков энергетических параметров тягово-приводных машинно-тракторных агрегатов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Л.А. Ризоев. – Л.: Изд-во ЛСХИ, 1974. – 23 с.
133. Рогожин С.В. Исследование систем управления: учеб. / С.В. Рогожин, Т.В. Рогожина. – М.: Экзамен, 2005. – 288 с.
134. Румшинский Л.Е. Математическая обработка результатов эксперимента / Л.Е. Румшинский. – М.: Наука, 1971. – 192 с.
135. Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 452 с.
136. Савельев А.П. Диагностирование тракторов по динамическому состоянию машинно-тракторных агрегатов / А.П. Савельев. – Саранск: Изд-во Мордовского ун-та, 1993. – 220 с.
137. Саксин А.Г. Режимы технического диагностирования тракторов по функциональным параметрам двигателей при неустановившейся нагрузке с учетом вида и частоты тестового воздействия: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.Г. Саксин. – Л.: Изд-во ЛСХИ, 1988. – 16 с.

138. Самсонов В.А. Оптимальное проектирование параметров и автоматизация режимов работы машинно-тракторных агрегатов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В.А. Самсонов. – М.: Изд-во МГАУ, 1996. – 36 с.

139. Самсонов В.А. Оптимизация основных параметров тракторного двигателя / В.А. Самсонов // Техника в сельском хозяйстве. – № 1. – С. 29–31.

140. Самсонов В.А. Теория и расчет сельскохозяйственного трактора: учеб. пособие / В.А. Самсонов, О.Н. Дидманидзе. – М.: Изд-во МГАУ, 1999. – 147 с.

141. Самсонов В.А. Автоматизированное проектирование ресурсосберегающих машинно-тракторных агрегатов / В.А. Самсонов, А.А. Зангиев, О.Н. Дидманидзе. – М.: Колос, 1997. – 232 с.

142. Сергиенко А.Б. Генетический алгоритм. Стандарт. Ч. I // Описание стандартного генетического алгоритма (сГА) / А.Б. Сергиенко, П.В. Галушин, В.В. Бухтояров. – Красноярск, 2010 – URL: http://www.harrix.org/main/project_standart_ga.php.

143. Селиванов Н.И. Топливная аппаратура автотракторных дизелей. Обслуживание и ремонт: учеб. пособие / Н.И. Селиванов, В.С. Кирин. – Красноярск 2002. – 112 с.

144. Семенкин Е.С. Об эволюционных алгоритмах решения сложных задач оптимизации / Е.С. Семенкин, А.В. Гуменникова, М.Н. Емельянова // Вестн. СибГАУ: сб. науч. тр. – Красноярск: Изд-во СибГАУ, 2003. – С. 14–23.

145. Семенкин Е.С. Метод обобщенного адаптивного поиска для синтеза систем управления сложными объектами / Е.С. Семенкин, В.А. Лебедев. – М.: МАКС Пресс, 2002.

146. Семенкин Е.С. Адаптивные поисковые методы оптимизации сложных систем / Е.С. Семенкин, О.Э. Семенкина, С.П. Коробейников. – Красноярск: Изд-во СИБУП, 1997. – 355 с.

147. Семенкин Е.С. Методы оптимизации в управлении сложными системами / Е.С. Семенкин, О.Э. Семенкина, В.А. Терсков. – Красноярск, 2000. – 254 с.

148. Сидыганов Ю.Н. Методы нормативного оснащения МТС техническими средствами и обеспечение их работоспособности / Ю.Н. Сидыганов. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2003. – 409 с.

149. Смелик В.А. Критерии оценки и методы обеспечения технологической надежности СХА с учетом вероятностной природы их работы: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В.А. Смелик. – СПб.-Пушкин: Изд-во СПбГАУ, 1999. – 52 с.

150. Смирнов В.Т. Повышение эффективности применения техники при производстве овощей в условиях НЗ РФ на основе системного анализа: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В.Т. Смирнов. – СПб.-Пушкин: Изд-во СПбГАУ, 1995. – 55 с.
151. Стратегия машинно-технологического обеспечения производства сельскохозяйственной продукции России на период до 2010 года. – М.: ВИМ, 2003. – 64 с.
152. Судник Ю.А. Автоматизированное управление машинно-тракторными агрегатами в сельском хозяйстве: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Ю.А. Судник. – М.: Изд-во МГАУ, 1999. – 36 с.
153. Теоретические основы системного анализа / под ред. В.И. Новосельцева. – М.: Майор, 2006. – 592 с.
154. Терсков В.А. Модели функционирования и методы оптимизации структуры многопроцессорных вычислительных систем: моногр. / В.А. Терсков. – Красноярск: Изд-во СибЮИ МВД России, 2001. – 335 с.
155. Типовые нормы выработки на агромелиоративные механизированные работы. – М.: Россельхозиздат, 1996. – 102 с.
156. Трактор Т-170.01 и его модификации. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – Челябинск, 1989. – 234 с.
157. Фирсов М.М. Состояние и перспективы развития автоматизации для сельхозмашин / М.М. Фирсов, А.И. Викторов, Б.М. Ломакин // Тракторы и с.-х. машины. – 1988. – № 4. – С. 8–9.
158. Хафизов К.А. Методика расчета МТА по критерию «совокупные энергозатраты» / К.А. Хафизов // Тракторы и с.х. машины. – 2006. – №3. – С. 46–51.
159. Хафизов К.А. Структура энергетических затрат на технологических операциях в растениеводстве / К.А. Хафизов // Энергообеспечение и энергосбережение в с.х.: тр. III Междунар. науч.-техн. конф. (14–15 мая 2003 г., Москва, ГНУ ВИЭСХ). Ч.2. Энергосберегающие технологии в растениеводстве и мобильной энергетике. – М.: Изд-во ГНУ ВИЭСХ, 2003. – С. 9–13.
160. Цугленок Н.В. Энерготехнологическое прогнозирование: учеб. пособие / Н.В. Цугленок. – Красноярск, 2004. – 276 с.
161. Цугленок Н.В. Влияние оптимальных параметров и режимов работы МТА на энергетические затраты технологического процесса / Н.В. Цугленок, С.Ю. Журавлев // Тр. IV Междунар. конф. молодых ученых, посвящ. 40-летию СО Россельхозакадемии. – Новосибирск, 2010. – С. 412–416.

162. Цугленок Н.В. Оценка влияния оптимальных показателей работы МТА на энергозатраты технологического процесса / Н.В. Цугленок, С.Ю. Журавлев // Вестн. КрасГАУ. – 2010. – №10. – С. 146–151

163. Шадрина Н.И. Эксплуатационная оценка энергетических и кинематических свойств колесных тракторов при различных характеристиках двигателя на примере трактора Т-150К на вспашке: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Н.И. Шадрина. – Л.-Пушкин, 1984. – 18 с.

164. Шаров Н.М. Эксплуатационные свойства машинно-тракторных агрегатов / Н.М. Шаров. – М.: Колос, 1981. – 240 с.

165. Шеповалов В.Д. Автоматика топоориентированных технологий в растениеводстве / В.Д. Шеповалов // Техника в с.х. – 2001. – №1. – С. 3–5.

166. Шипилевский Г.Б. Перспективы развития диагностики технического состояния тракторов на основе бортовых электронных средств / Г.Б. Шипилевский, В.С. Архипов // Тракторы и с.-х. машины. – 2004. – № 7. – С. 3–7.

167. Эвиев В.А. Методология определения оптимальных и допускаемых режимов работы машинно-тракторных агрегатов / В.А. Эвиев. – СПб.-Пушкин: Изд-во СПбГАУ, 2004. – 274 с.

168. Эвиев В.А. Определение прямых топливно-энергетических затрат сельскохозяйственных агрегатов / В.А. Эвиев // На рубеже тысячелетий: экология, экономика, образование, медицина: сб. науч. тр. – Т.8. – Ростов н/Д: Изд-во СКНЦ ВШ, 2001. – С. 56–57.

169. Эвиев В.А. Повышение эффективности функционирования тяговых и тягово-приводных агрегатов с трактором за счет оптимизации эксплуатационных режимов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В.А. Эвиев. – СПб.-Пушкин, 2006. – 32 с.

170. Юсупов Р.Х. Повышение эффективности функционирования машинно-тракторного агрегата за счет совершенствования статических и динамических характеристик его энергетической части: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Р.Х. Юсупов. – СПб.-Пушкин: Изд-во СПбГАУ, 1992. – 36 с.

171. Янковский И.Е. Концепция развития механизации, электрификации и автоматизации сельскохозяйственного производства Нечерноземной зоны России на 1995 г. и на период до 2000 г. / И.Е. Янковский, А.А. Устроенов, В.Ю. Грицык. – СПб.: Путь, 1993. – 200 с.

172. Coello C.A. An empirical study of evolutionary techniques for multiobjective optimization in engineering design: Ph. D thesis; department of computer science of Tulane university / C.A. Coello. – New Orleans, 1996.

173. Deb K. Multi-objective Optimization using Evolutionary Algorithms. Chichester / K. Deb. – UK: Wiley, 2001.

174. Fonseca C.M. Multiobjective optimization and multiple constraint handling with evolutionary algorithms. – Part I: A unified formulation. Technical report 564. University of Sheffield / C.M. Fonseca, P.J. Fleming. – Sheffield, 1995.

175. Goldberg D.E. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning / D.E. Goldberg. – MA: Addison-Wesley, 1989.

176. Goodman E. Evolutionary computation and its applications: proceedings of the International Conference / E. Goodman. – M.: IHPCS of RAS, 1996. – 350 p.

177. Holland J.H. (1975) Adaptation in natural and artificial systems / J.H. Holland. – Ann Arbor: University of Michigan Press.

178. Horn J. A niched Pareto genetic algorithm for multiobjective optimization / J. Horn., N. Nafpliotis, D.E. Goldberg // Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation. – Vol. 1. – Piscataway, 1994. – P. 82–87.

179. Michalewicz Z. Genetic algorithms, numerical optimization and constraints / Z. Michalewicz // Proc. of the Sixth Int. Conf. on Genetic Algorithms and their Applications. – Pittsburgh, 1995.

180. Schaffer J.D. Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms / J.D. Schaffer // J.J. Grefenstette Genetic Algorithms and Their Applications: proceedings of the First International Conference Algorithms. – Hillsdale NJ: Lawrence Erlbaum, 1985. – P. 93–100.

Научное издание

**МИНИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОЗАТРАТ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ
МАШИННО-ТРАКТОРНЫХ АГРЕГАТОВ**

Журавлев Сергей Юрьевич

Редактор В.А. Сорокина

Санитарно-эпидемиологическое заключение № 24.49.04.953.П. 000381 от 25.09.2003 г.

Подписано в печать 4.02.2014. Формат 60×84/16. Бумага тип. № 1

Печать ризограф. Усл. печ. л. 16,25 Тираж 500 экз. Заказ № 43

Издательство Красноярского государственного аграрного университета
660017, Красноярск, ул. Ленина, 117