

УДК 621.43:004.94
Код ГРНТИ 55.42.03

doi 10.54708/19926502_2025_29110778

Расчет эффективной мощности двигателя машинно-тракторных агрегатов на основе вероятностно-статистических эксплуатационных характеристик

Т.М. Шамсутдинова*, И.Э. Веденяпин, А.Г. Шарафутдинов

Башкирский государственный аграрный университет, г. Уфа, Республика Башкортостан, Россия

Аннотация. В данной статье рассматривается математическая модель расчета эффективной мощности двигателя машинно-тракторных агрегатов на основе их вероятностно-статистических эксплуатационных характеристик с учетом использования дополнительного транспортно-технологического модуля. Разработанная математическая модель программно реализована на языке программирования Python, проведен вычислительный эксперимент по расчету мощности, требуемой на транспортно-технологической модуль.

Ключевые слова: моделирование, программа расчета, двигатели, математическое ожидание, эффективная мощность.

*tsham@rambler.ru

Введение

Современное агропромышленное производство требует от машинно-тракторных агрегатов высоких показателей эффективности и надежности. Одним из ключевых факторов, определяющих производительность и функциональность таких агрегатов, является расчет эффективной мощности двигателя.

Эффективная мощность двигателей машинно-тракторных агрегатов (МТА) является ключевым параметром, определяющим их производительность и экономичность. Для оценки эффективной мощности используется ряд методов и подходов, среди которых особое место занимает применение вероятностно-статистических моделей.

Концептуальный подход к расчету мощности двигателей изложен в работе Л.Е. Агеева [1], в которой устанавливается связь между эксплуатационными характеристиками и мощностью агрегата. В этой работе была предложена модель расчета, основанная на статистическом анализе данных, полученных в ходе опытной эксплуатации.

Методы расчета оптимальных характеристик двигателей машинно-тракторных агрегатов с использованием математического и компьютерного моделирования рассмотрены в работах таких авторов, как Колчин А.И., Демидов В.П., Очиров Н.Г., Эвиев В.А., Иофинов А.П., Беляева Б.И., Хулхачиева С.Д., Журавлев С.Ю., Мучкаева Г.М., Элешов Б.С., Хотамов П.С., Манжиев С.С., Федельский Д.В., Кикеев Н.М., Сковородин В.Я., Кутьков Г.М. и др. Эти подходы помогают повысить точность моделей, позволив заранее предсказать поведение двигателя в различных эксплуатационных условиях.

При этом в работе [2] предложен алгоритм расчета математической модели эксплуатационных показателей МТА в среде Maple. В [3] рассматривается методика оптимизации параметров и режимов работы машинно-тракторных агрегатов с использованием генетических алгоритмов. В [4] описаны результаты разработки программного приложения для расчета эксплуатационных показателей машин для внесения удобрений. В [5] предложена методика расчета мощности двигателя трактора тягового класса 1,4 с технологическим модулем. В [6] рассмотрен алгоритм выбора базовой модели трактора для формирования тракторного поезда.

Общие вопросы энергопроизводительности сельскохозяйственных тракторов в полевых операциях и методы выбора их энергосберегающих характеристик рассмотрены, например, в работах [7–9] и многих других.

В частности, в статье [10] предложена методика расчета показателей работы машинно-тракторных агрегатов в случае использования активированного топлива. В работе [11] описана программа расчета функционирования машинно-тракторного агрегата и его оценочных показателей для почвообрабатывающих машин. В [12] рассмотрены особенности расчета производительности машинно-тракторных агрегатов при проектировании мобильных энергетических средств.

Надо заметить, что расчет энергосберегающих характеристик и эффективной мощности двигателя машинно-тракторных агрегатов является активно развивающейся областью исследований. Современные методы на основе вероятностно-статистических эксплуатационных характеристик дают возможность более глубоко понять динамику работы двигателей, а также обеспечить более точный и адаптивный подход к их эксплуатации и техническому обслуживанию.

В данной статье рассматривается методология расчета эффективной мощности двигателей машинно-тракторных агрегатов на основе вероятностно-статистических эксплуатационных характеристик. Важность данного подхода обусловлена стремлением к минимизации потерь мощности в процессе эксплуатации и повышению общей надежности агрегатов.

Математическое моделирование эффективной мощности двигателя машинно-тракторных агрегатов

Расчет эффективной мощности двигателя машинно-тракторных агрегатов – это сложная задача, требующая учета множества факторов, включая эксплуатационные характеристики, характеристики самого двигателя и условия его работы.

Постановка задачи расчета эффективной мощности двигателя.

Пусть требуется найти N – математическое ожидание эффективной мощности двигателя машинно-тракторных агрегатов, кВт.

Расчетные угловые коэффициенты, определяемые по стендовой (или типовой) характеристике двигателя в зависимости от крутящего момента на коленчатом валу, могут быть описаны выражениями вида [3, 13]:

$$a_0 = A_1 + A_3, \quad (1)$$

$$a_1 = A_1 - A_2, \quad (2)$$

$$a_2 = A_2 - A_3, \quad (3)$$

$$b_0 = B_1 + B_3, \quad (4)$$

$$b_1 = B_1 - B_2, \quad (5)$$

$$b_2 = B_2 - B_3, \quad (6)$$

где

$$A_1 = 0, \quad (7)$$

$$A_2 = N_n + (N_n - N_p) / (M_p / M_n - 1), \quad (8)$$

$$A_3 = N_p + (N_p - N_m) / (M_m / M_p - 1), \quad (9)$$

$$B_1 = N_n / M_n, \quad (10)$$

$$B_2 = (N_p - N_n) / (M_p - M_n), \quad (11)$$

$$B_3 = (N_m - N_p) / (M_m - M_p), \quad (12)$$

где использованы следующие обозначения:

Mn, Mp, Mm – номинальный, предельный, максимальный крутящий момент на валу двигателя, Н·м;

Nn, Np, Nm – значение мощности, соответствующей значению номинального, предельного, максимального значений крутящего момента на валу двигателя, кВт.

Далее обозначим:

$Vm[i]$ – коэффициенты вариации, для всех допустимых $i=1..r$;

$Mk[j]$ – крутящий момент на коленчатом валу двигателя, для всех $j=1..s$.

С использованием методик расчета, изложенных в работах [1, 2 и др.], получим следующую математическую модель (13)–(17):

$$N[i, j] = 0.5(a_0 + b_0 \cdot Mk[j]) + (b_1 \cdot Mk[j] + a_1) \cdot F(tn) + (b_2 \cdot Mk[j] + a_2) \cdot F(tp) - Vm[i] \cdot Mk[j] \cdot (b_1 \cdot \varphi(tn) + b_2 \cdot \varphi(tp)), \quad (13)$$

где $i=1..r$, $j=1..s$ и номинальное значение переменной t (аргумент функции Лапласа):

$$tn = (Mn - Mk[j]) / (Vm[i] \cdot Mk[j]), \quad (14)$$

предельное значение переменной t :

$$tp = (Mp - Mk[j]) / (Vm[i] \cdot Mk[j]), \quad (15)$$

плотность распределения аргумента:

$$\varphi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}}, \quad (16)$$

функция Лапласа:

$$F(t) = \int_0^t \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt, \quad (17)$$

Учитывая результаты работы [9], рассмотрим возможность обобщения изложенной методики расчета на случай трактора тяговой концепции с загруженным балластом в виде дополнительного транспортно-технологического модуля (ТТМ).

Номинальную эксплуатационную мощность двигателя в этом случае будем определять, как сумму мощности, реализуемой на создание номинального тягового усилия трактора без балласта, и мощности двигателя на привод колес ТТМ.

В этом случае получим дополнительное уравнение вида:

$$N_{НЭБ} = N_{НЭ} + N_{ТТМ}, \quad (18)$$

где в качестве $N_{НЭБ}$ обозначено математическое ожидание эффективной номинальной эксплуатационной мощности двигателя трактора тяговой концепции с учетом ТТМ;

$N_{НЭ}$ – математическое ожидание эффективной мощности, требуемой на создание номинального тягового усилия трактора без балласта;

$N_{ТТМ}$ – математическое ожидание эффективной мощности двигателя, требуемой на привод колес ТТМ.

Получаем, что математическое ожидание эффективной номинальной эксплуатационной мощности двигателя трактора тяговой концепции с учетом ТТМ может быть рассчитано по формуле (18), где для расчета каждого из слагаемых может быть использована предложенная в (1)–(17) модель расчета.

Особенность и новизна предлагаемой математической модели (1)–(18) заключается в применении вероятностно-статистического метода оценки параметров машинно-тракторных агрегатов к случаю трактора тяговой концепции с загруженным балластом в виде дополнительного транспортно-технологического модуля. Данный подход позволяет получить оценку

энергосберегающих характеристик двигателя тягового машинно-тракторного агрегата и провести расчет дополнительной мощности, требуемой на транспортно-технологической модуль.

Вычислительный эксперимент

Авторами была разработана программа на языке программирования Python, позволяющая проводить расчет эффективной мощности двигателя в случае трактора тяговой концепции с дополнительным транспортно-технологическим модулем.

Данная программа реализует разработанную математическую модель (1)–(18) с использованием сеточных методов расчета.

Суть используемого метода сеток состоит в замене области непрерывного изменения аргументов, в которой ищется решение уравнения, на дискретное множество точек (узлов), с аппроксимацией интегралов соответствующими им квадратурными формулами.

При этом были использованы библиотеки:

- math – применение математических функций;
- numpy – для работы с многомерными массивами;
- scipy – для выполнения научных и инженерных расчетов в частности был использован метод quad (), позволяющий вычислить определенный интеграл от заданной функции с использованием инструментов для интегрирования модуля integrate;
- matplotlib – для визуализации данных, включая объекты класса Axes3D. Возможности данной библиотеки по визуализации прикладных численных расчетов показаны, например, в работах [14–15].

На Рис. 1–2 представлен алгоритм (блок-схема) реализации приведенной математической модели (1)–(18) с использованием языка Python.

В качестве тестовых данных использовались эксплуатационные характеристики двигателя Д-442ВСИ-3, приведенные в работе [2] (Табл. 1). Полученные численные результаты (в предположении отсутствия балласта) при этом полностью соответствуют приведенным в [2] расчетам в среде Maple.

Таблица 1. Данные для тестирования программы (по Очирову Н.Г., Эвиеву В.А., Беляевой Б.И., Хулхачиевой С.Д. [2]).

Крутящий момент, Н·м		Мощность, кВт	
M _n	549,26	N _n	115,3
M _p	668,41	N _p	115,3
M _m	732,35	N _m	101,2
Массив данных		Коэффициенты вариации	
M _{k1}	467,88	V _{m1}	0,001
M _{k2}	549,26	V _{m2}	0,083
M _{k3}	601,57	V _{m3}	0,167
M _{k4}	668,41	V _{m4}	0,250
M _{k5}	735,25	V _{m5}	0,333

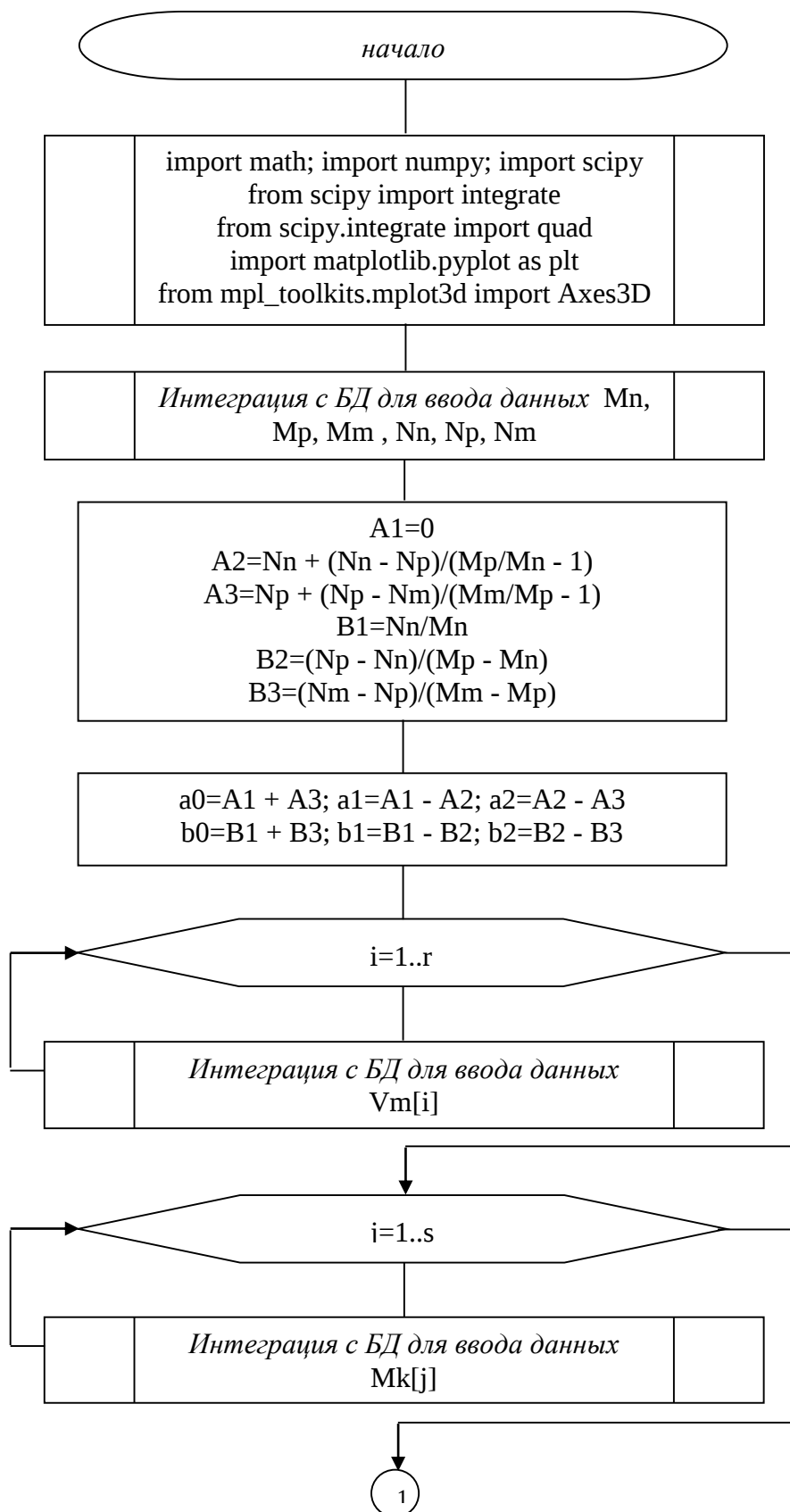


Рисунок 1. Алгоритм (начало).

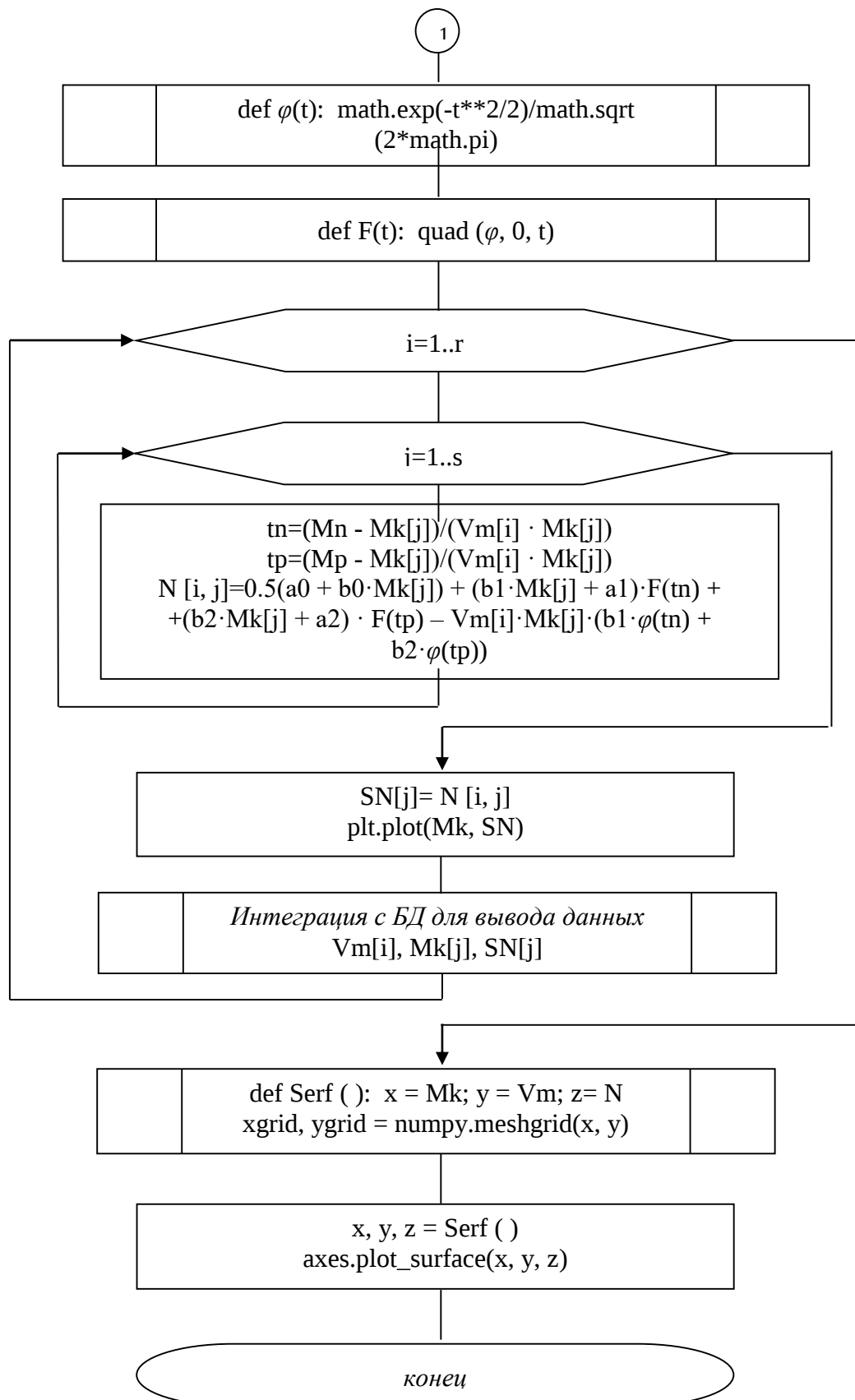


Рисунок 2. Алгоритм (окончание).

Для визуализации полученных результатов была построена графическая модель, представленная на Рис. 3.

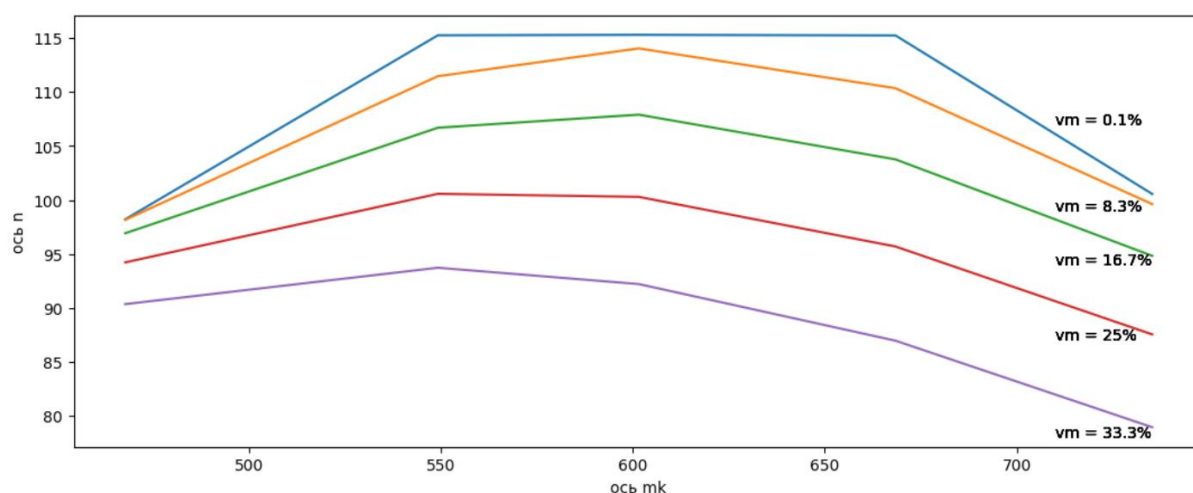


Рисунок 3. График изменения эффективной мощности двигателя в зависимости от крутящего момента и коэффициента вариации.

Далее было проведено численное исследование изменения эффективной мощности данного двигателя с учетом нагрузки от ТТМ (Рис. 4–5). Как видим из данных графиков, добавление транспортно-технологического модуля требует значительного увеличения мощности машинно-тракторного агрегата.

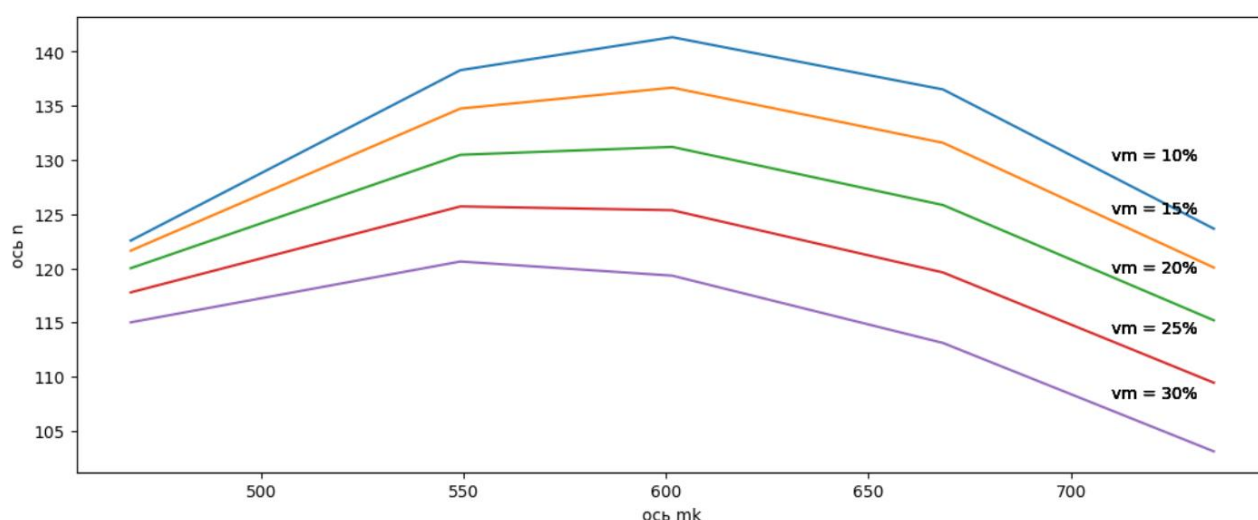


Рисунок 4. График изменения эффективной мощности двигателя в зависимости от крутящего момента и коэффициента вариации с учетом увеличения нагрузки от ТТМ на 25 % (по отношению к мощности, требуемой на создание номинального тягового усилия трактора без балласта).

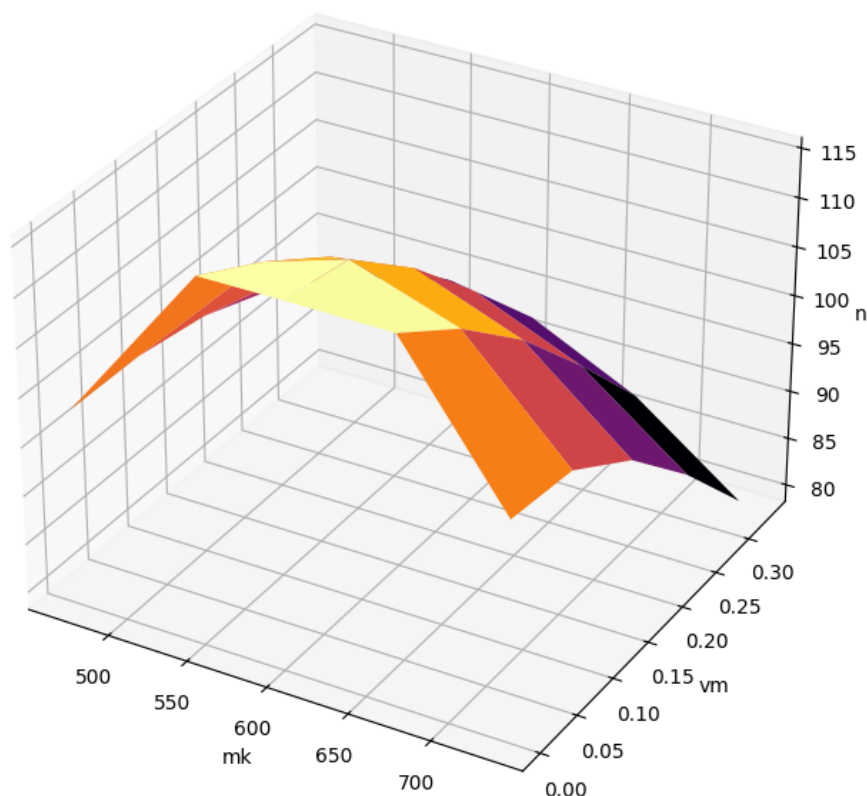


Рисунок 5. Распределение эффективной мощности двигателя в зависимости от крутящего момента M_k и коэффициента вариации V_m .

Данный алгоритм позволяет более точно оценить эффективную мощность двигателей МТА, принимая во внимание множество факторов, которые могут влиять на эксплуатационные характеристики. Использование вероятностно-статистических методов обеспечивает надежность и точность расчетов, что в свою очередь способствует более эффективному использованию ресурсов и повышению производительности машинно-тракторных агрегатов.

Заключение

В ходе данного исследования построена математическая модель расчета эффективной мощности двигателя машинно-тракторных агрегатов на основе их вероятностно-статистических эксплуатационных характеристик с учетом использования дополнительного транспортно-технологического модуля. Разработанная математическая модель программно реализована на языке программирования Python, проведен вычислительный эксперимент по расчету мощности с учетом транспортно-технологического модуля.

Результаты работы направлены на оптимизацию работы машинно-тракторных агрегатов за счет минимизации потерь мощности в процессе их эксплуатации. Данная работа не только рассматривает теоретические основы изучаемой проблемы, но и предлагает практическое решение для повышения общей надежности агрегатов. Дальнейшие исследования в данной области могут привести к еще более эффективным и универсальным методам проектирования тракторных двигателей, что будет способствовать устойчивому развитию агропромышленного комплекса.

Литература:

1. Агеев Л.Е. Основы расчета оптимальных и допускаемых режимов работы машинно-тракторных агрегатов. Л.: Колос, 1978. 294 с. [Ageev L.E. Fundamentals of calculating optimal and permissible operating modes of machine and tractor units. Leningrad: Kolos, 1978. 294 p. (in Russian)]

2. Очиров Н.Г., Эвиев В.А., Беляева Б.И., Хулхачиева С.Д. Алгоритм расчета математической модели эксплуатационных показателей МТА в среде Maple // Вестник аграрной науки Дона. 2017. № 3 (39). С. 55-63. [Ochirov N.G., Eviev V.A., Belyaeva B.I., Khulkhachieva S.D. An algorithm for calculating a mathematical model of MTA performance indicators in the Maple environment // Bulletin of Agrarian Science of the Don. 2017. No. 3 (39). pp. 55-63. (in Russian)]
3. Журавлев С.Ю. Методика оптимизации параметров и режимов работы машинно-тракторных агрегатов с использованием генетических алгоритмов // Вестник КрасГАУ. 2013. № 7 (82). С. 211-224. [Zhuravlev S.Y. Methodology of optimization of parameters and operating modes of machine-tractor units using genetic algorithms // Bulletin of KrasGAU. 2013. № 7 (82). pp. 211-224. (in Russian)]
4. Азаренко В.В., Жешко А.А. Результаты разработки программного приложения для расчета эксплуатационных показателей машин для внесения удобрений // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. 2024. Т. 62. № 2. С. 145-155. [Azarenko V. V., Zheshko A. A. The results of the development of a software application for calculating the performance of fertilizer machines // Bulletin of the National Academy of Sciences of Belarus. Series of Agricultural Sciences. 2024. Vol. 62. No. 2. pp. 145-155. (in Russian)]
5. Sidorov, Maksim & Lavrov, Alexander & Voronin, Victor & Sidorova, Anastasia. (2021). Calculation of engine power for a tractor of traction class 1.4 with a technological module. E3S Web of Conferences. 285. 07015. 10.1051/e3sconf/202128507015.
6. Toshboltaev M.T., Kholikov B.A. Algorithm for selecting a base tractor model to form a tractor train // Agricultural Machinery and Technologies. 2019. Т. 13. № 5. С. 46-50.
7. Zhu, Zhen & Yang, Yanpeng & Wang, Dongqing & Cai, Yingfeng & Lai, Longhui. (2022). Energy Saving Performance of Agricultural Tractor Equipped with Mechanic-Electronic-Hydraulic Power-train System. Agriculture. 12. 436. 10.3390/agriculture12030436.
8. Koniuszy, Adam & Kostencki, Piotr & Berger, Andrew & Golimowski, Wojciech. (2017). Power performance of farm tractor in field operations. Eksploatacja i Niezawodnosc - Maintenance and Reliability. 19. 43-47. 10.17531/ein.2017.1.6.
9. Кутьков Г.М., Сидоров В.Н., Сидоров М.В. Расчет мощности двигателя и веса трактора тягово-энергетической концепции // Электронный журнал: наука, техника и образование. 2016. № 2 (6). С. 37-46. [Kutkov G.M., Sidorov V.N., Sidorov M.V. Calculation of engine power and tractor weight traction and energy concept // Electronic Journal: Science, Technology and Education. 2016. No. 2 (6). pp. 37-46. (in Russian)]
10. Арженковский А.Г., Коршенко К.В., Краснов И.Н. Методика расчета показателей работы машинно-тракторных агрегатов при использовании активированного топлива // Вестник АПК Ставрополя. 2021. № 1 (41). С. 4-9. [Arzhenovsky A.G., Korshenko K.V., Krasnov I.N. Methodology for calculating performance indicators of machine and tractor units using activated fuel // Bulletin of the Agroindustrial Complex of Stavropol. 2021. No. 1 (41). pp. 4-9. (in Russian)]
11. Мардарьев С.Н., Михайлов А.Н., Петров П.К., Митягин Д.С., Юнкеров А.Н. Модель функционирования машинно-тракторного агрегата и программы для расчета его оценочных показателей // АгроЭкоИнфо. 2017. № 2 (28). С. 12. [Mardariyev S.N., Mikhailov A.N., Petrov P.K., Mityagin D.S., Yunkeroev A.N. A model of functioning of a machine-tractor unit and programs for calculating its estimated indicators // AgroEcoInfo. 2017. No. 2 (28). p. 12. (in Russian)]
12. Щиров В.В. Некоторые особенности расчета производительности машинно-тракторных агрегатов при проектировании новых мобильных энергетических средств // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2013. № 4 (12). С. 179-188. [Shchirov V.V. Some features of calculating the productivity of machine-tractor units in the design of new mobile energy facilities // Scientific Journal of the Russian Research Institute of Land Reclamation Problems. 2013. No. 4 (12). pp. 179-188. (in Russian)]
13. Мучкаева Г.М., Элешов Б.С., Хотамов П.С., Манжиев С.С., Федельский Д.В., Кикеев Н.М. Вероятностно-статистический метод оценки параметров тяговых агрегатов // Инженерный вестник Дона. 2017. № 2 (45). С. 16. [Muchkaeva G.M., Eleshov B.S., Khotamov P.S., Manjiev S.S.,

Fedelskiy D.V., Kikeev N.M. Probabilistic and statistical method for estimating traction unit parameters // Engineering Bulletin of the Don. 2017. No. 2 (45). p. 16. (in Russian)]

14. Витренко С.Н. Применение библиотеки Matplotlib языка программирования Python для построения электромеханической характеристики тягового двигателя ЭД-118 // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. 2023. № 12 (78). С. 122-124. [Vitrenko S.N. Application of the Matplotlib library of the Python programming language for constructing the electromechanical characteristics of the ED-118 traction motor // Bulletin of the Vladimir Dahl Lugansk State University. 2023. No. 12 (78). pp. 122-124. (in Russian)]

15. Дуркин А.А., Ермоленко А.В., Котелина Н.О., Туркова О.И. Визуализация численных расчетов средствами Python // Вестник Сыктывкарского университета. Серия 1: Математика. Механика. Информатика. 2024. № 2 (51). С. 14-26. [Durkin A.A., Ermolenko A.V., Kotelina N.O., Turkova O.I. Visualization of numerical calculations using Python // Bulletin of Syktyvkar University. Series 1: Mathematics. Mechanics. Computer Science. 2024. No. 2 (51). pp. 14-26. (in Russian)]

Об авторах:

ШАМСУТДИНОВА Татьяна Михайловна, канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры цифровых технологий и прикладной информатики, Башкирский государственный аграрный университет, tsham@rambler.ru.

ВЕДЕНЯПИН Игорь Эдуардович, канд. техн. наук, доцент кафедры цифровых технологий и прикладной информатики, Башкирский государственный аграрный университет, +79270808891, viggi62@yandex.ru.

ШАРАФУТДИНОВ Айдар Газизьянович, канд. экон. наук, заведующий кафедрой цифровых технологий и прикладной информатики, Башкирский государственный аграрный университет, aidar1641@yandex.ru.

Metadata:

Title: Calculation of the effective engine power of machine and tractor units based on probabilistic and statistical operational characteristics.

Author 1: Tatiana Mikhailovna Shamsutdinova, Bashkir State Agrarian University; Republic of Bashkortostan, Ufa, Russia, tsham@rambler.ru, ORCID ID 0000-0003-1809-3615, ResearcherID G-7779-2018, Scopus Author ID 6504441807.

Author 2: Igor Eduardovich Vedenyapin, Bashkir State Agrarian University; Republic of Bashkortostan, Ufa, Russia, viggi62@yandex.ru.

Author 3: Aidar Gazizyanovich Sharafutdinov, Bashkir State Agrarian University; Republic of Bashkortostan, Ufa, Russia, aidar1641@yandex.ru, ORCID ID 0000-0001-8823-8416, Scopus Author ID 57212083444.

Abstract: This article discusses a mathematical model for calculating the effective engine power of machine and tractor units based on their probabilistic and statistical performance characteristics, taking into account the use of an additional transport and technological module. The developed mathematical model is implemented in Python. A computational experiment was also conducted to calculate the power required for the transport and technological module.

Keywords: modeling, calculation program, engines, mathematical expectation, effective power.