

7. Čonka Z. Short circuit current calculations / Z. Čonka, K. Máslo, B. Batora // 2018 19th International Scientific Conference on Electric Power Engineering, EPE 2018 – Proceedings, 2018. P. 1-4.
8. Zhou, N., Wu, J., & Wang, Q. (2018). Three-Phase Short-Circuit Current Calculation of Power Systems with High Penetration of VSC-Based Renewable Energy. *Energies*. 11: 537.
9. Chen, T., Chen, M.S., Lee, W.-J., Kotas, P., van Olinda, P. (1991). Distribution system short circuit analysis - A rigid approach. *IEEE Transactions on Power Systems*. 7: 22-28.
10. Kim I. (2018). The effect of unbalanced impedance loads on the short-circuit current. *Energies*. 11 (6): 1447.
11. Fan C., Xu K., Liu Q. (2016). Short-circuit current calculation method for partial coupling transmission lines under different voltage levels. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 78: 647-654.
12. Volkov, M., Gusev, Yu., Monakov, Yu., Cho, G. (2016). The Effect of Current-Limiting Reactors on the Tripping of Short Circuits in High-Voltage Electrical Equipment. *Power Technology and Engineering*. 49: 1-3.
13. Mathur, A., Pant, V., Das, B. (2015). Unsymmetrical short-circuit analysis for distribution system considering loads. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 70.
14. Ramos M.J.S. Analysis of short-circuit asymmetrical currents in power distribution systems / M.J.S. Ramos, D.P. Bernardon, L. Comassetto, M. Resener, E.B. Daza // Proceedings of the Universities Power Engineering Conference. – 2012.
15. Cao, W., Wang, Y., Zhang, W., et al. (2012). Analysis on DC component in short-circuit current of power grid and its influence on breaking ability of circuit breakers. *Dianwang Jishu / Power System Technology*. 36: 283-288.
16. Kadkhodaei, G., Sheshyekani, K., Hamzeh, M. (2016). Coupled electric-magnetic-thermal-mechanical modelling of busbars under short-circuit conditions. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 10: 955-963.



УДК 631.372

С.Н. Шуханов  
S.N. Shukhanov

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЕЙ ТРАКТОРОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ ПУТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

### IMPROVEMENT OF AGRICULTURAL TRACTOR ENGINE OPERATION BY MEANS OF AUTOMATIC REGULATION

**Ключевые слова:** сельскохозяйственное производство, автотракторная техника, автоматическое регулирование двигателя.

Инновационное развитие сельскохозяйственного производства предполагает создание технических средств и технологий, отвечающих современным требованиям. Особая роль в этой совокупности задач отводится автотракторному обеспечению агропромышленного комплекса. Эффективность работы автотракторного агрегата в значительной мере определяется рациональным использованием мощности двигателя. Одним из существенных спо-

собов совершенствования дизеля является микропроцессорное управление работой системы автоматического регулирования. Значительную часть времени тракторные дизели работают в условиях неустановившихся режимов. При переходном процессе нарушается согласование рабочих процессов отдельных элементов системы автоматического регулирования, что приводит к ухудшению смеобразования и сгорания топлива, снижению коэффициента избытка воздуха, повышению дымности и токсичности отработанных газов. Путем использования математического аппарата получены модели, описывающие работу системы автоматического регулирования двигателей ав-

тотракторной техники сельскохозяйственного назначения. Полученные результаты дают общий теоретический фундамент для развития обобщенных спектральных методов анализа и синтеза САР.

**Keywords:** *agricultural production, automobiles and tractors, automatic engine control.*

Innovative development of agricultural production involves the creation of technical facilities and technologies that meet modern requirements. A special role in this set of tasks is assigned to the automobile and tractor support of the agro-industrial complex. The efficiency of the auto-tractor unit is largely determined by the rational use of engine power.

One of the essential ways to improve the diesel is the micro-processor control of the automatic control system. Most of the time, tractor diesel engines operate under unsteady conditions. In the transient process, the coordination of the working processes of the individual elements of the automatic control system is violated which leads to a deterioration in the mixture formation and combustion of fuel, a reduction in the excess air factor, an increase in smoke and toxicity of the exhaust gases. Using the mathematical apparatus, models describing the operation of the automatic regulation system for engines of agricultural tractors have been obtained. The results obtained give a general theoretical basis for the development of generalized spectral methods for analysis and synthesis of automatic control system.

**Шуханов Станислав Николаевич**, д.т.н., проф. каф. «Техническое обеспечение АПК», Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского. E-mail: Shuhanov56@mail.ru.

**Shukhanov Stanislav Nikolayevich**, Dr. Tech. Sci., Prof., Chair of Technical Support of Agricultural Industry, Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Yezhevskiy. E-mail: Shuhanov56@mail.ru.

### Введение

Инновационное развитие сельскохозяйственного производства предполагает создание технических средств и технологий, отвечающих современным требованиям [1]. Особая роль в этой совокупности задач отводится автотракторному обеспечению агропромышленного комплекса [2-4]. Эффективность работы автотракторного агрегата в значительной мере определяется рациональным использованием мощности двигателя. Одним из существенных способов совершенствования дизеля является микропроцессорное управление работой системы автоматического регулирования.

Значительную часть времени тракторные дизели работают в условиях неустановившихся режимов. При переходном процессе нарушается согласование рабочих процессов отдельных элементов системы автоматического регулирования, что приводит к ухудшению смесеобразования и сгорания топлива, снижению коэффициента избытка воздуха, повышению дымности и токсичности отработанных газов.

**Цель** работы – разработать теоретические предпосылки для развития обобщенных спектральных методов анализа и синтеза системы автоматического регулирования работы дизельного двигателя.

### Методы исследования

При проведении исследований использовались методы математического моделирования. Математическое описание переходных процессов системы автоматического урегулирования двигателя может быть осуществлено при представлении ее в виде совокупности взаимодействующих между собой элементов.

### Результаты исследования

Исходная математическая форма записи поведения системы автоматического регулирования (САР) в переходном процессе может быть представлена в виде передаточной функции, структурной схемы или в виде системы дифференциальных уравнений. Расчет переходных процессов САР с использованием компьютерных программ производится с большой точностью и практически не накладывает ограничений на порядок дифференциального уравнения САР.

Для решения дифференциальных уравнений на ЭВМ применяются приближенные методы Эйлера, Коши, Адамса, Рунге-Кутты и другие.

Систему дифференциальных уравнений, каждое из которых имеет произвольный порядок, описывающее переходный процесс в САР, путем введения промежуточных переменных можно привести к нормальной форме Коши [5]:

$$\begin{aligned} dx_1 / dt &= f_1(x_1, x_2, \dots, x_n, t) & dx_2 / dt &= f_2(x_1, x_2, \dots, x_m) \\ dx_2 / dt &= f_2(x_1, x_2, \dots, x_n, t) & dx_m / dt &= f_m(x_1, x_2, \dots, x_m) \\ dx_n / dt &= f_n(x_1, x_2, \dots, x_n, t) \end{aligned} \quad (1) \quad (2)$$

т.е. разрешить относительно производных первого порядка. Для удобства счета по всем переменным методом Рунге-Кутты время  $t$  в правых частях системы уравнений рассматривать как зависимую переменную  $x_{n+i} = t$  и к системе уравнений добавить еще одно дифференциальное уравнение  $m=n+1$ .

С учетом преобразований система уравнений примет следующий вид:

$$dx_1 / dt = f_1(x_1, x_2, \dots, x_m)$$

$$\begin{aligned} k_{j1} &= \Delta f_j(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ji}, \dots, x_{mi}) \\ k_{j2} &= \Delta f_j(x_{1i} + k_{j1}/2, x_{2i} + k_{j1}/2, \dots, x_{ji} + k_{j1}/2, \dots, x_{mi} + k_{j1}/2) \\ k_{j3} &= \Delta f_j(x_{1i} + k_{j2}/2, x_{2i} + k_{j2}/2, \dots, x_{ji} + k_{j2}/2, \dots, x_{mi} + k_{j2}/2) \\ k_{j4} &= \Delta f_j(x_{1i} + k_{j3}/2, x_{2i} + k_{j3}/2, \dots, x_{ji} + k_{j3}/2, \dots, x_{mi} + k_{j3}/2) \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\Delta t$  – шаг интегрирования.

Если работа САР в переходном процессе представлена передаточной функцией, то в общем виде она имеет вид:

$$W(p) = (b_n p^n + b_{n-1} p^{n-1} + \dots + b_i p^i + \dots + b_1 p + b_0) / (a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_i p^i + \dots + a_1 p + a_0) \quad (6)$$

Входная  $Y$  и выходная  $X$  переменные САР, соответствующие передаточной функции, состоят из следующих уравнений:

$$Y = a_n (d^n x_0 / dt^n) + a_{n-1} (d^{n-1} x_0 / dt^{n-1}) + \dots + a_{ni} (d^n x_0 / dt^i) + \dots + a_1 (dx_0 / dt) + a_0 x_0; \quad (7)$$

$$X = b_n (d^n x_0 / dt^n) + b_{n-1} (d^{n-1} x_0 / dt^{n-1}) + \dots + b_i (d^i x_0 / dt^i) + \dots + b_1 (dx_0 / dt) + b_0 x_0. \quad (8)$$

Для преобразования в нормальной форме Коши вводятся промежуточные переменные:

$$\begin{aligned} dx_0 / dt &= x_1 \\ dx_1 / dt &= x_2 \\ dx_i / dt &= x_{i+1} \\ dx_{n-1} / dt &= x_n \end{aligned} \quad (9)$$

С учетом этого уравнения переписуются в следующем виде:

$$Y = a_n x_n + a_{n-1} x_{n-1} + \dots + a_i x_i + \dots + a_1 x_1 + a_0 x_0; \quad (10)$$

$$X = b_n x_n + b_{n-1} x_{n-1} + \dots + b_i x_i + \dots + b_1 x_1 + b_0 x_0, \quad (11)$$

которые являются конечными уравнениями.

В большинстве случаев перед расчетом переходных процессов система автоматического регулирования исследуется на устойчивость и качество переходного процесса теоретическими методами по структурной схеме САР. В этом случае необходимо по структурной схеме составить систему дифференциальных и алгебраических уравнений, описывающих поведение САР в переходном процессе, а затем для использования в расчете метода Рунге-Кутты привести систему дифференциальных уравнений к нормальной форме Коши.

Расчет частотных характеристик САР с помощью компьютерных программ может быть проведен на основе передаточной функции, структурной схемы или системы дифференциальных уравнений. Полный алгоритм расчета вещественной, мнимой и амплитудно-частотных характеристик состоит в реализации следующих формул.

Подставляя в передаточную функцию (6)  $p = iw$ , получим:

$$W(iw) = (B_r + iB_q) / (A_r + iA_q), \quad (12)$$

где  $B_r = b_0 b_2 w^2 + b_4 w^4 + b_6 w^6 + \dots = b_0 - w^2 [b_2 - w^2 [b_4 - w^2 [b_6 - \dots] \dots]],$  (13)

$$B_q = b_1 w - b_3 w^3 + b_5 w^5 - b_7 w^7 + \dots = w \{ b_1 - w^2 [b_3 - w^2 [b_5 - w^2 [b_7 - \dots] \dots]] \}, \quad (14)$$

$$A_r = a_0 - w^2 [a_2 - w^2 [a_4 - w^2 [a_6 - \dots] \dots]], \quad (15)$$

$$A_q = w \{ a_1 - w^2 [a_3 - w^2 [a_5 - w^2 [a_7 - \dots] \dots]] \}, \quad (16)$$

Анализ полученных зависимостей (13)-(16) показывает, что вычисление мнимых и вещественных частей числителя и знаменателя производятся по общей схеме [6].

Для расчета частотных характеристик выражение (12) приводится к виду:

$$W(iw) = p(w) + iQ(w) = A(w)e^{if(w)} \quad (17)$$

где  $p(w) = (A_r B_r + a_q B_q) / (A_{2r} + A_{2q})$  (18)

$$Q(w) = (A_r B_r - A_q B_r) / (A_{2r} + A_{2q}) \quad (19)$$

$$A(w) = \sqrt{p^2(w) + Q^2(w)} \quad (20)$$

Полный алгоритм расчета вещественной, мнимой и амплитудно-частотных характеристик на ЭВМ состоит в реализации формул (13)-(20).

Зависимость для вычисления фазовой частотной характеристики [5], имеющей вид:  $\varphi(w) = \arctg Q(w) / p(w)$  для удобства вычислений на ЭВМ, преобразуем в

$$\varphi(w) = \arg W(iw) = \arg [(B_r + iB_q) / (A_r + iA_q)] = \arctg B_q - \arctg A_q / A_r \quad (21)$$

Расчет частотных характеристик по структурной схеме и по заданной системе дифференциальных уравнений производится по вышеизложенной методике.

Для анализа работы САР можно применить широко известный частотный метод [7]. В настоящее время практически нет такого класса САР, который не поддавался бы анализу и синтезу с помощью частотного метода. Для получения алгоритма применим метод, основу которого составляют ряды Фурье, соответствующие выбранному ортогональному базису (полиномы Ле-

жандра, Эрмита, Чебышева и других), и обобщенная трансформация Фурье.

С помощью интеграла Фурье решаются задачи анализа переходных процессов, вероятностного анализа и синтеза оптимальных по статическим и детерминическим критериям САР.

### Вывод

Получены теоретические предпосылки для развития обобщенных спектральных методов анализа и синтеза системы автоматического регулирования работы дизельного двигателя.

**Библиографический список**

1. Болоев, П. А. Разработка ресурсосберегающих технологий эксплуатации и диагностики транспортных машин в условиях Восточной Сибири / П. А. Болоев, С. Н. Шуханов. – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2016. – 148 с. – Текст: непосредственный.
2. Шуханов, С. Н. Определение концентрации газа в смазочном материале трансмиссий энергонасыщенных тракторов сельскохозяйственного назначения / С. Н. Шуханов. – Текст: непосредственный // Тракторы и сельхозмашины. – 2017. – № 8. – С. 37-40.
3. Шуханов, С. Н. Оценка работоспособности распылителей форсунок дизельных двигателей / С. Н. Шуханов. – Текст: непосредственный // Вестник Курской ГСХА. – 2017. – № 7. – С. 37-40.
4. Шуханов, С. Н. Анализ гидродинамических характеристик распылителей форсунок ДВС / С. Н. Шуханов // Тракторы и сельхозмашины. – 2018. – № 3. – С. 3-6.
5. Бедлман, Р. Динамическое программирование и современная теория управления / Р. Бедлман, Р. Калаба. – Москва: Наука, 1969. – 118 с. – Текст: непосредственный.
6. Гантмахер, Ф. Р. Теория матриц / Ф. Р. Гантмахер. – Москва: Гостехиздат, 1954. – 491 с.
7. Лысов, М. И. Рулевые управления автомобилей / М. И. Лысов. – 2-е изд. перераб. и доп. –

Москва: Машиностроение, 1972. – 344 с. – Текст: непосредственный.

**References**

1. Boloev P.A. Razrabotka resursosberegayushchikh tekhnologiy ekspluatatsii i diagnostiki transportnykh mashin v usloviyakh Vostochnoy Sibiri / P.A. Boloev, S.N. Shukhanov. – Irkutsk: Izdatelstvo IRNITU, 2016. – 148 s.
2. Shukhanov S.N. Opredelenie kontsentratsii gaza v smazochnom materiale transmissiy energonasyshchennykh traktorov selskokhozyaystvennogo naznacheniya // Traktory i selkhoz mashiny. – 2017. – No. 8. – S. 37-40.
3. Shukhanov S.N. Otsenka rabotosposobnosti raspyliteley forsunok dizelnykh dvigateley // Vestnik Kurskoy GSKhA. – 2017. – No. 7. – S. 37-40.
4. Shukhanov S.N. Analiz gidrodinamicheskikh kharakteristik raspyliteley forsunok DVS // Traktory i selkhoz mashiny. – 2018. – No. 3. – S. 3-6.
5. Bedlman R. Dinamicheskoe programmirovaniye i sovremennaya teoriya upravleniya / R. Bedlman, R. Kalaba. – M.: Nauka, 1969. – 118 s.
6. Gantmakher F.R. Teoriya matrits. – M.: Gostekhizdat, 1954. – 491 s.
7. Lysov M.I. Rulevye upravleniya avtomobiley. – 2-e izd. pererab. i dop. – M.: Mashinostroeniye, 1972. – 344 s.

