

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДОК  
НА ОСНОВЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

## ANALYSIS OF WIRING CONDITION BASED ON THERMOTECHNICAL MODEL

**Ключевые слова:** электропроводка, срок эксплуатации, температурный режим, теплопроводность, износ, проводящая способность.

Подавляющая часть установочных электропроводок в сельском хозяйстве или уже выработала свой ресурс, или находится на пределе нормативного срока эксплуатации. Принимая во внимание невозможность регулярной смены электропроводок при постоянном росте энерговооруженности сельскохозяйственного производства, а также невозможность, по экономическим причинам, прокладки электропроводок повышенного сечения, вследствие непредсказуемости роста энергопотребления, встает вопрос оперативного контроля износа электропроводок и своевременного принятия мер по недопущению аварийной ситуации. Так как режим эксплуатации электропроводок, как правило, имеет циклический характер, определяемый временем и объемом электропотребления в течение суток, влиянием суточного температурного режима, климатическими температурными колебаниями сезона и года, а также температурными отклонениями климата от года к году, то оценку износа проводок и их работоспособность возможно производить только вероятностными методами. Как правило, процессы деградации проводок имеют в своей основе теплотехнические процессы. Рост величины тока в электропроводке, вызванный ростом потребления (независимо от причин), вызывает рост количества дислокаций в токоносителе, что, в свою очередь, вызывает рост сопротивления проводника и дальнейшее повышение его температуры до наступления температурного баланса с окружающей средой. Постепенный рост деградации структуры проводника приводит к росту его собственного сопротивления и ускоренному снижению проводящей способности проводки. В статье рассматривается вопрос влияния электроток на температурный режим и теплопроводность электро-

проводки, которые и определяют процессы снижения качества передачи тока.

**Keywords:** wiring, operation life, temperature condition, thermal conductivity, wear, conducting ability.

Most installation wirings in agriculture are already worn out or at the limit of their standard operation lives. Whereas there is no possibility to change the wiring regularly while there is a constant increase in power available per worker in agriculture as well as there is no possibility to run wirings with increased sections because of economic reasons and also that there is an unpredictability of the energy consumption growth, a question arises of wiring wear efficient control and taking well-timed measures to prevent emergency situations. As running conditions of wiring are cyclic in character as a rule and are determined by time and volume of power consumption within 24 hours; influence of daily temperature conditions; climatic temperature fluctuations within a season and a year; climatic temperature fluctuations from year to year it is possible to estimate wear of the wirings and their operating capacities only with probabilistic methods. As a rule, the processes of wiring degradation come from thermo-technical processes. The growth of the current magnitude in the wiring caused by the increase in the consumption (regardless of the reasons) results in the growth of the dislocation number in current-carrying wires; this in its turn results in the increase of conductor resistance conducting abilities and further rise of the temperature till thermal balance with the environment comes. Gradual increase of degradation of the conductor structure results in the rise of its own resistance and accelerated reduction of the conducting abilities of the wiring. The influence of electrical current on the temperature conditions and thermal conductance of the wiring that determine processes of the quality reduction of the current transfer is discussed.

**Костюков Анатолий Федорович**, к.т.н., ст. преп., каф. электрификации и автоматизации сельского хозяйства, Алтайский государственный аграрный университет. Тел.: (3852) 62-84-49. E-mail: kostjukovaf@mail.ru.

**Kostyukov Anatoliy Fedorovich**, Cand. Tech. Sci., Asst. Prof., Chair of Electrification and Automation of Agriculture, Altai State Agricultural University. Ph.: (3852) 62-84-49. E-mail: kostjukovaf@mail.ru.

Учёт и оценка безопасности действующих сельских распределительных сетей, производственных и жилых зданий регламентированы требованиями ПУЭ, которые устанавливают правила выбора, прокладки, эксплуатации, нахождения и устранения отказов электропроводок [1]. Однако до настоящего времени не существует теорети-

чески обоснованного метода определения износа существующих, длительно эксплуатируемых, электропроводок.

Подавляющая часть установочных электропроводок в сельском хозяйстве или уже выработала свой ресурс, или находится на пределе нормативного срока эксплуатации [2]. Принимая во внимание невозможность

регулярной смены электропроводок при постоянном росте энерговооруженности сельскохозяйственного производства, а также невозможность, по экономическим причинам, прокладки электропроводок повышенного сечения, вследствие непредсказуемости роста энергопотребления, встает вопрос оперативного контроля износа электропроводок и своевременного принятия мер по недопущению аварийной ситуации [3].

Так как режим эксплуатации электропроводок, как правило, имеет циклический характер, определяемый временем и объемом электропотребления в течение суток, влиянием суточного температурного режима, климатическими температурными колебаниями сезона и года, а также температурными отклонениями климата от года к году, то оценку износа проводок и их работоспособность возможно производить только вероятностными методами [4].

**Целью** исследования является выявление принципиальной возможности оценки степени износа электропроводок и определения времени их эксплуатации до отказа.

**Задачами** исследования являются:

- определение параметров электропроводок, наиболее выразительно отображающих снижение их эксплуатационных качеств;

- анализ существующих неразрушающих методов контроля применительно к поставленной цели;

- разработка методик технологического контроля состояния электропроводок как в пассивном, так и в рабочем состоянии.

Как правило, процессы деградации проводок имеют в своей основе теплотехнические процессы. Квантовая теория металлов объясняет зависимость удельной проводимости от температуры:  $\sigma \sim 1/t^0$  (классическая теория –  $\sigma \sim 1/\sqrt{t^0}$ ), а также аномально большие величины (порядка сотен периодов решетки) средней длины свободного пробега электронов в металле [5]. Рост величины тока в электропроводке, вызванный ростом потребления (независимо от причин), вызывает рост количества дислокаций в токоносителе, что, в свою очередь, вызывает рост сопротивления проводника и дальнейшее повышение его температуры до наступления температурного баланса с окружающей средой. Постепенный рост деградации структуры проводника приводит к росту его собственного сопротивления и ускоренному снижению проводящей способности проводки.

В настоящей публикации рассматривается вопрос влияния электротока на температурный режим и теплопроводность электропроводки, которые и определяют процессы снижения качества передачи тока.

Коэффициент теплопроводности изоляционных материалов лежит в пределах 0,0233-2,8 Вт/м·град., в то время как для проводников он равен величинам порядка 400 Вт/м·град., т.е. наблюдается определенная инерционность процесса теплопередачи из проводника в окружающее пространство, вызванное теплоизолирующими свойствами электроизолирующего покрытия проводника тока. Однако, учитывая временные интервалы изменения силы тока, вследствие цикличности потребления в реальных электросетях, можно условно принять режим подачи электротока как переменного-постоянный.

Если элемент цилиндрической поверхности  $dS$  за время  $d\tau$  выделяет в окружающее пространство количество тепла, равное

$$\alpha (T_c - T_n) dS d\tau, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплопроводности, то для нахождения общей конвекции энергии по всей поверхности тела за период времени  $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$  расход тепловой энергии составит

$$\Delta Q = Q_2 - Q_1 = \alpha S \int_{\tau_1}^{\tau_2} [T_c - T_n(\tau)] d\tau, \quad (2)$$

В данном случае для оценки работоспособности продолжительно эксплуатируемой проводки можно представить носитель тока как монолитный цилиндр неограниченной длины, покрытый изоляционным слоем, с переменными источниками тепла, действующим на протяжении всего процесса теплообмена.

Принимая, что все элементы проводящей системы взаимно независимы, имеют типичное экспоненциальное распределение времени безотказной работы, а отказ одного из элементов рассматривается как отказ всей системы, то в этом случае функция распределения времени безотказной работы определяется выражением

$$F(T) = 1 - e^{-\sum_{i=1}^k \lambda_i T}, \quad (3)$$

где  $F(T)$  – функция распределения времени безотказной работы системы;

$\lambda$  – интенсивность отказов во времени;

$T$  – время реализации функции до отказа;

$k$  – количество независимых элементов системы.

Иначе говоря, рассматривается конвективный теплообмен между цилиндрическим телом и окружающей средой при постоянной подаче тепла в цилиндр, т.е. граничное условие третьего рода [6].

Поскольку наблюдаемое тепловое поле, в котором удельная мощность источника тепла является функцией времени вида  $\dot{\omega}_0 \tau^{1/2n}$ , где  $\dot{\omega}_0$  – удельная начальная мощность источника тепла в изображениях,

$\tau > 0$  – время,  $n > -2$ , то при граничных условиях

$$\begin{aligned} T(r,0) &= f(r), \\ -\frac{\partial T(R,\tau)}{\partial r} + H[T_c - T(R,\tau)] &= 0, \\ \frac{\partial T(0,\tau)}{\partial r} &= 0, T(0,\tau) \neq \infty. \end{aligned} \quad (4)$$

Уравнение теплопроводности в цилиндрических координатах будет иметь следующий вид [6]:

$$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \quad (5)$$

где  $r, \theta, z$  – цилиндрические координаты.

Частное решение дифференциального уравнения теплопроводности для неограниченного цилиндра при коаксиальном распределении изотерм относительно оси имеет вид

$$\vartheta(r,\tau) = [CJ_0(kr) + DY_0(kr)] e^{-k^2 a \tau}, \quad (6)$$

где  $J_0(kr)$  и  $Y_0(kr)$  функции Бесселя 1- и 2-го родов нулевого порядка;

$C$  и  $D$  – постоянные, определяемые из начальных условий.

Это же решение в виде степенного ряда запишется как

$$u_2 = u_1 \int u_1^{-2} e^{-\int \frac{1}{x} dx} dx, \quad (7)$$

где  $u_1(x) = J_0(x)$  – первое частное решение

$$J_0(x) = 1 - \frac{x^2}{2^2} + \frac{x^4}{2^2 \cdot 4^2} - \frac{x^6}{2^2 \cdot 4^2 \cdot 6^2}, \quad (8)$$

$$u_2(x) = J_0(x) \ln x + \frac{x^2}{2^2} - \frac{x^4}{2^2 \cdot 4^2} \left(1 + \frac{1}{2}\right) + \frac{x^6}{2^2 \cdot 4^2 \cdot 6^2} \left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3}\right) \quad (9)$$

соответственно, второе частное (независимое от  $u_1(x)$ ) решение.

Чаще всего вместо  $u_2(x)$  используют выражение  $Y_0(x)$ , связанное с ним следующим соотношением:

$$Y_0(x) = \frac{2}{\pi} u_2(x) + \frac{2}{\pi} J_0(x) (C - \ln 2), \quad (10)$$

где  $C = 0,5772\dots$  – постоянная Эйлера.

Тогда, применяя граничные условия третьего рода, получим дифференциальное уравнение для изображения

$$\frac{\partial T(0,\tau)}{\partial x} + H[T_c - T(0,\tau)] = 0. \quad (11)$$

Соответственно

$$\begin{aligned} T_L(x,s) - \frac{T_0}{s} &= \\ &= \frac{T_c - T_0}{s \left(1 + \frac{1}{H} \sqrt{\frac{s}{a}}\right)} e^{-\sqrt{\frac{s}{a}} x} + \\ &+ \frac{\dot{\omega}_0 \Gamma\left(1 + \frac{1}{2} n\right)}{c \gamma s^{2+1/2n}} \left[ 1 - \frac{1}{1 + \frac{1}{H} \sqrt{\frac{s}{a}}} e^{-\sqrt{\frac{s}{a}} x} \right] \end{aligned} \quad (12)$$

где  $H = \frac{\alpha}{\lambda}$  – относительный коэффициент теплообмена;

$\Gamma(m)$  – гамма-функция;

$\alpha$  – коэффициент температуропроводности;

$c$  – удельная теплоемкость;

$\gamma$  – плотность тела;

$s$  – площадь изотермической поверхности;

$\theta$  – средняя температура.

Отсюда оригинал принимает значение

$$\begin{aligned} \theta = & \operatorname{erfc} \frac{x}{2 \sqrt{a\tau}} - e^{Hx+H^2a\tau} \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2 \sqrt{a\tau}} + H \sqrt{a\tau} \right) + \\ & + \frac{\dot{\omega}_0 \tau^{1+1/2n}}{c\gamma (T_c - T_0) \left(1 + \frac{1}{2} n\right)} + \frac{\dot{\omega}_0 \Gamma \left(1 + \frac{1}{2} n\right)}{c\gamma (T_c - T_0) a^{1/2n} (-H)^{n+2}} \times \\ & \times \left[ e^{Hx+H^2a\tau} \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2 \sqrt{a\tau}} + H \sqrt{a\tau} \right) - \right. \\ & \left. - \sum_{m=0}^{n+2} (-2H \sqrt{a\tau})^m i^m \operatorname{erfc} \frac{x}{2 \sqrt{a\tau}} \right]. \end{aligned} \quad (13)$$

В нашем случае рассматривается бесконечный электропроводящий цилиндр, находящийся под воздействием источника тока переменной величины, что вызывает переменный во времени тепловой режим. Носитель электротока имеет изолирующую оболочку по всей длине проводника, т.е. мы имеем двухсоставной цилиндр. Теплообмен между оболочкой и средой производится по закону Ньютона [7]. Тогда распределение температуры в системе равно

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_1}{\partial \tau} &= a_1 \left( \frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) \quad (\tau > 0; 0 \leq r \leq R_1); \\ \frac{\partial T_2}{\partial \tau} &= a_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} \quad (\tau > 0; R_1 \leq r \leq R_2); \\ T_1(r, 0) &= T_2(r, 0) = T_0 = \text{const}; \\ T_1(R_1, \tau) &= T_2(R_1, \tau); \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1(R_1, \tau)}{\partial r} = \lambda_2 \frac{\partial T_2(R_1, \tau)}{\partial r} \\ T_1(0, \tau) &< \infty; \quad -\lambda_2 \frac{\partial T_2(R_2, \tau)}{\partial r} + \alpha [T_c - T_2(R_2, \tau)] = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

Используя преобразование Лапласа, получаем

$$\begin{aligned} \frac{T_1(r, \tau) - T_0}{T_c - T_0} &= 1 - \sum_{n=1}^{\infty} A_n J_0(\mu_n r/R_1) \exp(-\mu_n^2 Fo), \\ \frac{T_2(r, \tau) - T_0}{T_c - T_0} &= 1 - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \{ J_0(\mu_n) \cos[\mu_n K_a^{1/2} (r/R_1 - 1)] - \\ & - K_\varepsilon J_1(\mu_n) \sin[\mu_n K_a^{1/2} (r/R_1 - 1)] \} \exp(-\mu_n^2 Fo), \end{aligned}$$

где  $\mu_n$  – корни характеристического уравнения.

$$\begin{aligned}
 & J_0(\mu) [\text{Bi} \cos K_a^{1/2} (K_R - 1) \mu - K_a^{1/2} K_R \mu \sin K_a^{1/2} (K_R - 1) \mu] - \\
 & - K_\varepsilon J_1(\mu) [\text{Bi} \sin K_a^{1/2} (K_R - 1) \mu + K_a^{1/2} K_R \mu \cos K_a^{1/2} (K_R - 1) \mu] = 0; \\
 A_n = & \frac{2\text{Bi} K_\varepsilon [K_a^{1/2} (K_R - 1) \mu_n + \text{Bi} \text{tg} K_a^{1/2} (K_R - 1) \mu_n]}{\mu_n J_0(\mu_n) \sin K_a^{1/2} (K_R - 1) \mu_n} \left\{ [K_\varepsilon^2 K_a (K_R - \right. \\
 & - 1)^2 \mu_n^2 + \text{Bi}^2] \text{ctg} K_a^{1/2} (K_R - 1) \mu_n + \frac{2K_\varepsilon K_a^{1/2} (K_R - 1)}{\sin 2K_a^{1/2} (K_R - 1) \mu_n} [\text{Bi}^2 + \\
 & + K_a (K_R - 1)^2 \mu_n^2] + [K_a (K_R - 1)^2 \mu_n^2 + 2K_\varepsilon K_a^{1/2} (K_R - 1) \text{Bi} + \\
 & + K_\varepsilon^2 \text{Bi}^2] \text{tg} K_a^{1/2} (K_R - 1) \mu_n + K_\varepsilon K_a (K_R - 1)^2 \mu_n^2 + \\
 & \left. + 2K_\varepsilon^2 K_a^{1/2} (K_R - 1) \mu_n \text{Bi} - 2K_a^{1/2} (K_R - 1) \mu_n \text{Bi} - \frac{K_\varepsilon \text{Bi}^2}{\mu_n}]^{-1} \right\}, \quad (15)
 \end{aligned}$$

где  $K_\varepsilon$  – критерий, характеризующий тепловую активность первого тела по отношению ко второму;

$K_\lambda = \lambda_1/\lambda_2$  – относительная теплопроводность тела;

$K_a = \frac{a_1}{a_2}$  – критерий относительных тепло-инерционных свойств тел;

$K_R$  – коэффициент отношения наружного и внутреннего радиусов.

Так как на внутренней и внешней боковых поверхностях наружного цилиндра (оболочки) заданы граничные условия третьего рода, то может быть использовано преобразование

$$\begin{aligned}
 \{T(r, z, \tau)\}_H &= \int_{R_1}^{R_2} T(r, z, \tau) r U_0(\mu_m r/R_1) dr, \\
 U_0(\mu_m r/R_1) &= [J_0(\mu_m) + \frac{1}{\text{Bi}_1} \mu_m J_1(\mu_m)] Y_0(\mu_m r/R_1) - \\
 &- [Y_0(\mu_m) + \frac{1}{\text{Bi}_1} Y_1(\mu_m)] J_0(\mu_m r/R_1); \\
 \mu_m &\text{ – корни уравнения } \frac{U_0(x\mu_m)}{U_1(x\mu_m)} = \frac{x\mu_m}{\text{Bi}_2} \quad (m = 1, 2, \dots), \\
 U_1(\mu_m r/R_1) &= [J_0(\mu_m) + \frac{\mu_m}{\text{Bi}_1} J_1(\mu_m)] Y_1(\mu_m r/R_1) - \\
 &- [Y_0(\mu_m) + \frac{1}{\text{Bi}_1} \mu_m Y_1(\mu_m)] Y_1(\mu_m r/R_1); \\
 \text{Bi}_1 &= \frac{\alpha_1 R_1}{\lambda}; \text{Bi}_2 = \frac{\alpha_2 R_2}{\lambda}; x = \frac{R_2}{R_1}. \quad (16)
 \end{aligned}$$

где  $\text{Bi}$  – критерий Био;

$$x = \frac{R_2}{R_1},$$

$R_1, R_2$  – внутренний и наружный радиусы внешнего цилиндра. Тогда формула обращения имеет вид

$$\begin{aligned}
 T(r, z, \tau) &= \sum_{m=1}^{\infty} 2 \{T\}_H U_0(\mu_m r/R_1) R_1^{-2} \left\{ x^2 U_0^2(x\mu_m) \left[ 1 + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \left( \frac{\text{Bi}_2}{x\mu_m} \right)^2 \right] - \frac{4}{\pi^2 \text{Bi}_1^2} \left[ 1 + \left( \frac{\text{Bi}_1}{\mu_m} \right)^2 \right] \right\}^{-1}. \quad (17)
 \end{aligned}$$

При краевых условиях

$$T(r, z, 0) = T_0,$$

$$\frac{\partial T(R_1, z, \tau)}{\partial r} - \frac{\alpha_1}{\lambda} T(R_1, z, \tau) = 0; \frac{\partial T(R_2, z, \tau)}{\partial r} + \frac{\alpha_2}{\lambda} T(R_2, z, \tau) = 0,$$

$$\frac{\partial T(r, 0, \tau)}{\partial z} = 0; \frac{\partial T(r, l, \tau)}{\partial z} + \frac{\alpha}{\lambda} T(r, l, \tau) = 0$$

$$(R_1 \leq r \leq R_2, -l \leq z \leq l); \tag{18}$$

Решением является нижеследующее уравнение [8]

$$\theta = \frac{T - T_0}{T_c - T_0} = 1 - \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_m A_n U_0(\mu_m r/R_1) \cos \mu_n \frac{z}{l} \times$$

$$\times \exp [-(\mu_m^2 + b^2 \mu_n^2) Fo_1], \tag{19}$$

где

$$A_m = \frac{2 [Bi_2 U_0(x, \mu_m) + 2/\pi]}{x^2 U_0^2(x, \mu_m) \left[ \mu_m^2 + \left( \frac{Bi_2}{x} \right)^2 \right] - \frac{4}{\pi^2 Bi_1^2} [\mu_m^2 + Bi_1^2]},$$

$$A_n = (-1)^{n+1} \frac{2 Bi \sqrt{Bi^2 + \mu_n^2}}{\mu_n^2 (Bi^2 + Bi + \mu_n^2)}, \quad Bi = \frac{\alpha l}{\lambda}.$$

$$Fo = \frac{\alpha \tau}{R^2} \text{ — число Фурье} \tag{20}$$

Поскольку изолирующая оболочка не является носителем активной энергии, то в стационарном режиме наблюдается равенство коэффициента обмена внешней и внутренней поверхностях, т.е.  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ . Вследствие этого [9] коэффициент

$$A_m = \frac{2Bi_1}{(\mu_m^2 + Bi_1^2) \left[ x U_0(x, \mu_m) - \frac{2}{\pi Bi_1} \right]}. \tag{21}$$

Все вышеизложенное позволяет сделать следующие **выводы**:

1. Изменение температурного режима электропроводящей системы под воздействием переменного во времени электрического тока происходит по экспоненциальному закону, где степень экспоненты представляет собой сумму функции ошибки ( $erfc$ ) интегрального произведения коэффициентов вносимой и конвективно рассеиваемой тепловой энергии.

2. При линейно-ступенчатом росте (убывании) электрического тока, проходящего через носитель, рост (убывание) тепловой нагрузки происходит по экспоненте.

3. Теплоизоляционные свойства электроизолирующей оболочки носителя электрического тока не оказывают существенного влияния на температурный режим проводника. При условии длительности установив-

шихся режимов, исчисляемых десятками минут, длительность переходных тепловых режимов не превышает единиц секунд.

#### Библиографический список

1. Правила устройства электроустановок (ПУЭ-7). – М.: Энергия, 2007. – 704 с.
2. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. – М.: Наука, 1965. – 534 с.
3. Weibull W. Scatter of fatigue life and fatigue strength in aircraft structural materials and parts. Fatigue in aircraft structures. Academic Press, Inc., New York, N.Y. 1956.
4. Тульчин И.К., Нудлер Г.И. Электрические сети и электрооборудование жилых и общественных зданий. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 480 с.
5. Киттель Ч. Квантовая теория твердых тел. – М.: Наука; Изд-во физико-матем. лит-ры, 1967. – 492 с.
6. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
7. Кондратьев Г.М. Регулярный тепловой режим. – М.: Гос. изд-во технико-теорет. л-ры, 1956. – 408 с.
8. Плят Ш.Н. Распределение температуры в абразивных изделиях в процессе термической обработки (обжига). – М.: ИФЗ, 1960. – Т. 111. – № 7.

9. Пляцко Г.В. Температурное поле в полом цилиндре при переменных граничных условиях. – М.: ИФЖ, 1959. – Т. 11. – № 10.

**References**

1. Pravila ustroystva elektroustanovok (PUE-7). – М.: Energiya, 2007. – 704 s.
2. Gnedenko B.V., Belyaev Yu.K., Solov'ev A.D. Matematicheskie metody v teorii nadezhnosti. – М.: Nauka, 1965. – 534 s.
3. Weibull W. Scatter of fatigue life and fatigue strength in aircraft structural materials and parts. Fatigue in aircraft structures. Academic Press, Inc., New York, N.Y. 1956.
4. Tul'chin I.K., Nudler G.I. Elektricheskie seti i elektrooborudovanie zhilykh i obsh-

chestvennykh zdaniy. – М.: Energoatomizdat, 1990. – 480 s.

5. Kittel' Ch. Kvantovaya teoriya tverdykh tel. – М.: Nauka, Izd. fiziko-matematicheskoi literatury, 1967. – 492 s.
6. Lykov A.V. Teoriya teploprovodnosti. – М.: Vyssh. shkola, 1967. – 600 s.
7. Kondrat'ev G.M. Regulyarnyi teplovoi rezhim. – М.: Gos. izdat. tekhniko-teoret. literat., 1956. – 408 s.
8. Plyat Sh.N. Raspredelenie temperatury v abrazivnykh izdeliyakh v protsesse termicheskoi obrabotki (obzhiga) // IFZh. – 1960. – Т. 111. – № 7.
9. Plyatsko G.V. Temperaturnoe pole v polom tsilindre pri peremennykh granichnykh usloviyakh // IFZh. – 1959. – Т. 11. – № 10.



УДК 621.434

**М.Л. Вертей**  
M.L. Vertey

**ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА РАЗГОНА ДВИГАТЕЛЯ  
С ПРИНУДИТЕЛЬНЫМ ВПРЫСКОМ ТОПЛИВА  
И ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ ТОПЛИВОПОДАЧЕЙ  
ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ТЕСТОВОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ**

**SUBSTANTIATION OF FREE ACCELERATION METHOD  
FOR ELECTRONICALLY CONTROLLED FORCED FUEL INJECTION ENGINE  
IN THE PROCESS OF TESTING DIAGNOSTICS**

***Ключевые слова:** свободный разгон резким открытием дроссельной заслонки, свободный разгон при фиксированном положении дроссельной заслонки, характеристика свободного разгона, давление во впускном коллекторе, цикловое наполнение, частота вращения коленчатого вала, динамическая производительность электромагнитных форсунок.*

Показан метод оценки технического состояния бензинового двигателя. При исследовании свободного разгона карбюраторного двигателя отмечалось, что перевод двигателя в режим свободного разгона путем резкого увеличения подачи топлива (резкого открытия дроссельной заслонки) неприемлем, так как работа насоса-ускорителя неизбежно искажает характеристику свободного разгона. Замещение карбюраторных двигателей на двигатели с принудительным впрыском топлива и электрическим управлением топливоподачей дают новые возможности для осуществления тестовых режимов с целью получения диагностической информации, так как позволяют управлять топливоподачей. Однако свободный разгон не может

быть задан резким открытием дроссельной заслонки из-за неоднозначного влияния переходных характеристик. Проведен анализ процессов во впускном трубопроводе при различных положениях дроссельной заслонки и скорости ее перемещения. Выявлено, что на переходный процесс существенно влияют способы управления и выбранные калибровки. В связи с тем, что невозможно или трудно определить на основании теоретического анализа влияние способа свободного разгона на выходные характеристики двигателя ЗМЗ 4062.10, принят экспериментальный путь. Исследования проводились с применением диагностического комплекса МТ-10. Свободный разгон осуществлялся двумя способами: резким открытием дроссельной заслонки; включением-выключением подачи топлива при достижении пороговых значений при фиксированном положении дроссельной заслонки. Установлено, что способ осуществления свободного разгона двигателя существенно влияет на выходные параметры характеристики частоты вращения коленчатого вала двигателя.