Грузовик

11
2019

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

Учредитель ООО "Научно-техническое издательство "Инновационное машиностроение"

Главный редактор С.Н. ПЕДЕНКО

Редакционный совет

В.С. Антипенко, д-р техн. наук, проф.
Е.В. Балакина, д-р техн. наук, проф.
Д.Х. Валеев, д-р техн. наук
Ю.Э. Васильев, д-р техн. наук, проф.
В.А. Волчков, "Autotransportnik.ru"
С.М. Гайдар, д-р техн. наук, проф.
Л.В. Грехов, д-р техн. наук, проф.
В.А. Зорин, д-р техн. наук, проф.
М.Ю. Карелина, д-р техн. наук, проф.
Н.Т. Катанаев, д-р техн. наук, проф.
В.Н. Козловский, д-р техн. наук, проф.
В.В. Комаров, канд. техн. наук
А.В. Кочетков, д-р техн. наук, проф.
В.А. Марков, д-р техн. наук, проф.
Л.Б. Миротин, д-р техн. наук, проф.
А.Н. Новиков, д-р техн. наук, проф
А.Н. Ременцов, д-р пед. наук, проф.
О.Н. Румянцева, генеральный директор ООО "Изд-во Инновационное машиностроение"
А.Ф. Синельников, канд. техн. наук, проф.
А.А. Солнцев, д-р техн. наук, проф.
В.С. Устименко, канд. техн. наук
Х.А. Фасхиев, д-р техн. наук, проф.
Н.Д. Чайнов, д-р техн. наук, проф.

Корпункт:
Я.Е.Карповский (г.Минск)

Адрес редакции:
107076, Москва, Колодезный пер., дом 2-а, стр. 12
Тел. (499) 269-48-96
E-mail: gruzovik@mashin.ru; http://www.mashin.ru

Адрес издательства:
107076, Москва, Колодезный пер., дом 2-а, стр. 2
Тел.(495) 661-03-36

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Регистрационный номер ПИ № ФС77-63955 от 09.12.2015 г.

Подписной индекс:
по объединенному каталогу
"Пресса России" 39799

ООО «Издательство «Инновационное машиностроение», "Грузовик", 2019

Перепечатка материалов из журнала «Грузовик» возможна при обязательном письменном согласовании с редакцией журнала. При перепечатке материалов ссылка на журнал «Грузовик» обязательна.

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

В НОМЕРЕ:

Конструкция

3 *Докшин И. В.* Математическая модель автомобиля-самосвала с комбинированным тяговым приводом

10 *Геращенко В. В., Лобах В. П., Коваленко Н. А., Билык О. В.* Проектирование датчика частоты вращения валов автомобиля

Энергетическое машиностроение

15 *Фасхиев Х. А.* Электрический привод — будущее автотранспорта. Часть 2

Исследования. Расчет

24 *Козловский В. Н., Пьянов М. А., Клейменов С. И., Заятров А. В.* Актуализация проблемы разработки и реализации производственного комплекса диагностики неисправностей системы электрооборудования автомобилей на основе анализа переходных процессов

Транспортный комплекс

31 *Смык А. Ф., Спиридонова Л. В.* Вклад отечественных изобретателей в эволюцию систем охлаждения двигателей внутреннего сгорания

Практика

36 *Янчевский В. А., Махов С. Г.* Углубить рисунок протектора грузовой шины или наварить новый — экономическая целесообразность

40 *Строкин А. А.* "Гулкие" производственные помещения и опыт их использования для совершенствования акустических и эксплуатационных параметров оборудования

Журнал входит в Перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней http://perechen.vak2.ed.gov.ru/
Система Российского индекса научного цитирования www.elibrary.ru. Двухлетний импакт-фактор РИНЦ 2017 г. — 0,542. Место в рейтинге SCIENCE INDEX за 2017 г. по тематике "Транспорт" — 27; по тематике "Машиностроение" — 52.

Информация на сайте "Autotransportnik.ru"

Truck

11
2019

SCIENTIFIC-TECHNICAL AND INDUSTRIAL MAGAZINE

Founder JSC Scientific and Technical Publishing House "Innovative Engineering"

Editor-in-Chief S.N. PEDENKO

Editorial council

V.S. Antipenko, dr. en. s., prof.
E.V. Balakina, dr. en. s., prof.
D.H. Valeev, dr. en. s.
Ju.E. Vasilyev, dr. en. s., prof.
B.A. Volchkov, «Autotransportnik.ru»
S.M. Gaidar, dr. en. s., prof.
L.V. Grekhov, dr. en. s., prof.
V.A. Zorin, dr. en. s., prof.
M.Ju. Karelina, dr. en. s., prof.
N.T. Katanaev, dr. en. s., prof.
V.N. Kozlovsky, dr. en. s., prof.
V.V. Komarov, cand. tehn. s.
A.V. Kochetkov, dr. en. s., prof.
V.A. Markov, dr. en. s., prof.
L.B. Mirotin, dr. en. s., prof.
A.N. Novikov, dr. en. s., prof.
A.N. Rementsov, dr. hab, phd in en. s.
O.N. Rumyantseva, gen. dir. JSC "Publisher "Innovative Engineering"
A.F. Sinelnikov, cand. tehn. s., prof.
A.A. Solntsev, dr. en. s., prof.
V.S. Ustymenko, cand. tehn. s.
J.A. Faskhiyev, dr. en. s., prof.
N.D. Chaynov, dr. en. s., prof.

Correspondent's office:
Ya.E. Karpovsky (Minsk)

Address of the editorial office:
107076, Moscow, Kolodezny Lane, house 2-a, str. 12
Ph. (499) 269-48-96
E-mail: gruzovik@mashin.ru; snp748@yandex.ru
http://www.mashin.ru

Address of publishing house:
107076, Kolodezny Lane, house 2-a, str. 2
Ph. (495) 661-03-36

The magazine is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Communications (Roskomnadzor).
Registration number PI number FS77.-63955 on December 9, 2015

Subscription index:
according to the integrated catalog "Press of Russia" 39799

JSC Innovatsionnoye mashinostroyeniye Publishing House, "Truck", 2019

CONTENTS:

Design

3 *Dokshin I. V.* Mathematical model of a dump truck with hybrid traction drive

10 *Gerashchenko V. V., Lobach V. P., Kovalenko N. A., Bilyk O. V.* Design of the car shaft speed sensor

Energy engineering

15 *Faskhiev Kh. A.* Electric drive — the future of motor transport. Part 2

Research. Calculation

24 *Kozlovskiy V. N., Pianoff M. A., Kleimenov S. I., Zayatrov A. V.* Actualization of the problem of developing and implementing a production complex for diagnosing faults in the electrical equipment system of cars based on the analysis of transient processes

Transportation complex

31 *Smyk A. F., Spiridonova L. V.* Contribution of the Russian inventors to the development of internal combustion engine cooling systems

Practice

36 *Yanchevskiy V. A., Makhov S. G.* To make the drawing of the tread of the truck tyresor toboil the new — economic expediency

40 *Strokin A. A.* Echoing the production facilities and the experience of their use for improving the acoustic and operational

Information on the site "Autotransportnik.ru" The reprint of materials from the "Truck" magazine is possible at obligatory written coordination with editorial office of the magazine. At the link to the "Truck" magazine is obligatory for a reprint of materials.

For contents of advertizing materials responsibility is born by the advertiser.

УДК 629.331

И. В. Докшин, инженер, Тюменское высшее военно-инженерное командное училище имени маршала инженерных войск А. И. Прошлякова
E-mail: dokshinigor@rambler.ru

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АВТОМОБИЛЯ-САМОСВАЛА С КОМБИНИРОВАННЫМ ТЯГОВЫМ ПРИВОДОМ

Исследована математическая модель движения автомобиля. В модель движения включены математические модели двигателя, комбинированной трансмиссии и колес. Математическая модель представляет интерес для дальнейшего совершенствования конструктивных параметров автомобилей с комбинированным тяговым приводом.

Ключевые слова: *автомобиль-самосвал, математическая модель движения автомобиля, активный привод.*

Investigated mathematical model of movement of the vehicle. The model of movement includes mathematical models of the engine, hybrid transmission and wheels. The mathematical model is of interest to further improve the design parameters of truck with hybrid traction drive.

Keywords: *dump truck, mathematical model of movement of the vehicle, active drive.*

Авторами в работе [2] проведен анализ условий эксплуатации трехосных автомобилей-самосвалов. В результате проведенных исследований обоснована следующая схема силового привода:

наличие дифференциального привода между постоянно включенными средним и задним мостами;

возможность принудительной блокировки межосевого дифференциала;

блокированный привод между средним и задним мостами;

активный привод переднего моста с возможностью автоматического подключения (отключения).

Однако существующие в настоящее время математические модели движения автомобиля не в полной мере учитывают использование комбинированного привода транспортного средства. Целью настоящей работы является разработка вышеуказанной модели.

Автосамосвал представляет собой сложную пространственную динамическую систему, работа которой может быть описана при помощи математической модели, являющейся совокупностью дифференциальных уравнений, описывающих динамические процессы, происходящие в этой системе. При этом также необходимо учитывать кинематические зависимости, ограничения, внешние воздействия, начальные условия, действующие на систему [5, 8]. Математическая модель должна наиболее просто и точно отображать свойства описываемого объекта [4, 10]. Для этого в описание динамической системы необходимо внести упрощения.

Основные принятые допущения и ограничения

При упрощении реальной динамической системы следует пренебречь теми параметрами, учет которых повышает точность математической модели на 2...3 %, что соответствует погрешности экспериментальных измерений [1, 11]. На рис. 1 показана схема автосамосвала с действующими на него нагрузками при включенном приводе переднего ведущего моста.

На схеме приняты следующие обозначения:

G — вес автосамосвала; $R_1...R_3$ — нормальные реакции грунта на колеса автосамосвала; $T_1...T_3$ — сила тяги, развиваемая ведущими колесами; P_w — сила сопротивления воздуха; $P_{кр}$ — сила тяги на крюке; α — угол продольного уклона.

Можно пренебречь поперечным уклоном дороги, так как он составляет менее 2 %.

Тяговый баланс автосамосвала при работе на продольном уклоне описывается зависимостью:

$$P_K = T + f_k G \cos\alpha \pm G \sin\alpha, \qquad (1)$$

где f_k — коэффициент сопротивления качению.

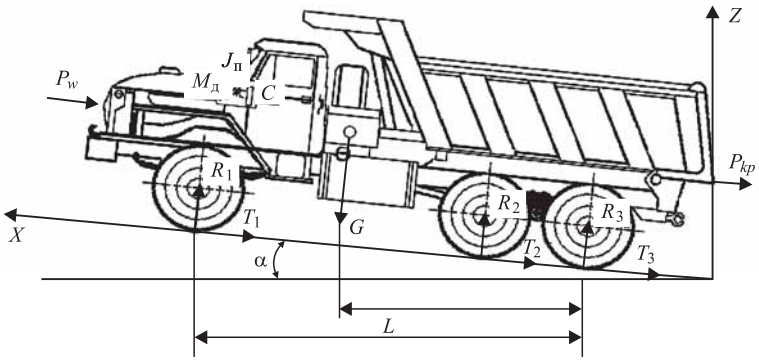

Рис. 1. Схема сил, действующих на автосамосвал при включенном приводе переднего ведущего моста

При движении автосамосвала на рабочих скоростях по неровной поверхности возникают вертикальные колебания, имеющие незначительную величину [3].

Изменение силовых радиусов колес при работе автосамосвала, обусловленное перераспределением вертикальных нагрузок между левым и правым бортами, приводит к кинематическому рассогласованию теоретических скоростей колес. Однако многоколесный движитель можно заменить одноколесным с обобщенными характеристиками.

При низкочастотной нагрузке динамические характеристики дизельного двигателя определяются работой регулятора топливного насоса.

Характеристики регуляторов современных дизельных двигателей рассмотрены в работе [9], при этом определено, что в диапазоне частот 0...5 Гц работу регулятора можно считать практически идеальной. Следовательно, в диапазоне рабочих нагрузок автосамосвала 0,5...1 Гц регулятор топливного насоса двигателя можно считать идеальным.

Представленные результаты расчетов и анализ расчетных схем, принимаемых для разработки математической модели движения автосамосвала, позволили при разработке математической модели автосамосвала с комбинированным приводом принять следующие допущения:

— динамическая модель включает активные инерционные и диссипативные силы;

— центробежный регулятор дизельного двигателя является идеальным;

— несущая система — абсолютно твердое тело, имеющее продольную плоскость симметрии, возникающие деформации в конструкции кузова в результате движения в модели не учитываются;

— уравнения связей между угловыми и линейными отклонениями точек несущей системы и мостов, при колебаниях, линейны;

— диссипативные элементы учитывают потери энергии на трение в механизмах трансмиссии;

— связи колес с опорной поверхностью дороги описываются уравнениями, учитывающими только упругое скольжение (колеса не отрываются от дороги);

— связь колес с кузовом автомобиля в вертикальной плоскости рассматривается как жесткая, т. е. без учета упругих свойств подвески;

— маршрут движения представляется прямолинейным, состоящим из ряда участков, каждый из которых имеет постоянные значения всех его параметров: коэффициента сопротивления движению, коэффициента сцепления с дорожным покрытием, продольного уклона α, предельной допускаемой скорости.

Системы уравнений математической модели

В данной статье рассматривается математическая модель автосамосвала с комбинированным приводом, разработанная на основании следующих уравнений движения, кинематических и функциональных зависимостей, составленных с учетом принятых допущений.

Регуляторная характеристика дизельного двигателя с центробежным регулятором, динамические свойства которого аппроксимируются апериодическим звеном первого порядка, описывается в функции крутящего момента следующей зависимостью [6, 12]:

$$\omega_e = \omega_{ex} - bM_e - dc^{k(M_e - M_{e\max})}, \qquad (2)$$

где M_e — крутящий момент на выходном валу двигателя; ω_{ex} — максимальная угловая скорость вращения вала двигателя; b, d, c, k — коэффициенты аппроксимирующей зависимости, а часовой расход топлива зависимостью:

$$G_e = k_e\omega_e, \qquad (3)$$

где k_e — коэффициент.

Выходную характеристику дополнительного переднего привода аппроксимируем зависимостью:

$$V_{T_1} = V_{T_{1\max}} - a_м\left(b_м M_1\right)^{c_м} - d_м M_1\omega_e/\omega_{eн}, \qquad (4)$$

где V_{T_1} — теоретическая скорость колесного движителя переднего моста; $a_м$, $b_м$, $c_м$, $d_м$ — ко-

эффициенты аппроксимирующей зависимости, M_1 — момент на ведущем (входном) валу дополнительного привода.

Окружные силы колесных движителей переднего моста:

$$P_{K_1} = M_1 i_{мсо} \eta_{мсо} i_{дп} \eta_{дп} / r_{c_1}, \quad (5)$$

где $i_{мсо}\eta_{мсо}$ — общее передаточное число и кпд согласующих редукторов; $i_{дп}$ — кинематическое передаточное число дополнительной передачи; $\eta_{дп}$ — полный кпд дополнительной передачи; r_{c_1} — силовой радиус колесного движителя переднего моста.

Для дополнительной передачи передаточное число является функцией крутящего момента M_1, который определялся по выходной характеристике

$$i_{дп} = f(M_1). \quad (6)$$

Выходная характеристика гидрообъемной передачи строилась с учетом характеристик насоса, гидромотора, кпд гидропередачи по следующим зависимостям.

Подача насоса:

$$Q_н = \frac{V_н n_н \eta_{V_н}}{1000}, \quad (7)$$

где $V_н$ — объем насоса; $n_н$ — частота вращения вала насоса; $\eta_{V_н}$ — объемный кпд насоса.

Требуемый объем гидромотора:

$$V_м = \frac{Q_м n_м \eta_{V_м}}{1000}, \quad (8)$$

где $Q_м = Q_н$.

Крутящий момент на валу гидромотора:

$$M_1 = \frac{1,56 V_м \Delta_p}{100 \eta_{V_м}}, \quad (9)$$

где $V_м$ — рабочий объем гидромотора; Δ_p — разность давлений в гидроприводе; $\eta_{V_м}$ — объемный кпд гидромотора.

Среднего моста:

$$P_{K_2} = M_2 i_{мп} \eta_{мп} / r_{c_2}, \quad (10)$$

где M_2 — момент на ведущем (входном) валу механического привода; $i_{мп}$ и $\eta_{мп}$ — общее передаточное число и кпд механического привода; r_{c_2} — силовой радиус колесного движителя задней балансирной тележки.

Заднего моста:

$$P_{K_3} = M_3 i_{мп} \eta_{мп} / r_{c_3}. \quad (11)$$

Теоретическая скорость колесного движителя:

$$V_{T_i} = r_{ci} \omega_e / i_{по}, \quad (12)$$

где $i_{по}$ — общее передаточное отношение соответствующего привода.

Коэффициент буксования колесного движителя δ_i равен:

$$\delta_i = \frac{V_{T_i} - V_{Д_i}}{V_{T_i}} = \frac{1 - V_{Д_i}}{V_{T_i}}. \quad (13)$$

Взаимосвязь относительной силы тяги ψ_i и коэффициента буксования δ_i аппроксимируем зависимостью:

$$\psi_i = a_{\delta_i} \operatorname{arctg}\left(b_{\delta_i} \delta_i\right)^{c_\delta}, \quad (14)$$

где a_δ, b_δ, c_δ — коэффициенты аппроксимирующей зависимости.

Сила тяги колесного движителя:

$$T_i = \psi_i R_i, \quad (15)$$

где R_i — нормальная реакция опорной поверхности, действующая на колесный движитель.

Вертикальная реакция в пятне контакта колеса с опорной поверхностью определяется следующей зависимостью:

$$R_i = P_{K_i} + m_{k_i} g \cos\alpha \quad (16)$$

где g — ускорение свободного падения; α — угол наклона опорной поверхности; m_{k_i} — масса колеса.

Для трехосного АМН с задней балансирной тележкой:

$$R_1 + R_2 + R_3 - \frac{G_a \cos\alpha}{2} = 0; \quad (17)$$

$$R_2 - R_3 = 0; \quad (18)$$

$$G_a \cos\alpha X_{ki} - 2\left(M_1 + M_2 + M_3\right) + P_{кр} Z_{TCY} - 4R_2\left(L - \frac{L_{2-3}}{2}\right) = 0. \quad (19)$$

На ведущем режиме для колесного движителя справедливо равенство:

$$P_k = T + P_f, \quad (20)$$

где $P_f = f_k R$ — сила сопротивления качению; f_k — коэффициент сопротивления качению.

В настоящее время силовые потери, имеющие место в шинах, оцениваются коэффициентом f_k сопротивления качению колеса, представляющим собой отношение силы сопротивления качению колеса к нагрузке на колесо [13].

Специфика условий движения автосамосвала предопределяет необходимость учета при определении f_k гистерезисные потери на деформацию шины и потери на деформацию грунта. В этом случае коэффициент сопротивления качению можно представить суммой двух составляющих:

$$f_k = f_{ш} + f_{г}, \tag{21}$$

где $f_{ш}$ — коэффициент сопротивления качению шины; $f_{г}$ — коэффициент сопротивления деформации грунта.

Коэффициент сопротивления качению является одной из важнейших характеристик шины и зависит от целого ряда конструктивных и эксплуатационных параметров [7]. Их влияние так велико, что не позволяет использовать величину f_k в качестве постоянной технической характеристики шины. Влияние различных параметров целесообразно выделить в специальные функции. Они могут быть учтены функциональными сомножителями в виде $k_{ш}$, $k_{г}$. И тогда выражение (21) можно представить в следующем виде:

$$f_k = k_{ш} f_{ош} + k_{г} f_{ог}, \tag{22}$$

где $k_{ш}$ — функция коррекции коэффициента сопротивления качению шины; $k_{г}$ — функция коррекции коэффициента сопротивления деформации грунта; $f_{ош}$ — коэффициент сопротивления качению шины в ведомом режиме с номинальной нагрузкой и давлением воздуха в шине; $f_{ог}$ — коэффициент сопротивления деформации грунта в ведомом режиме с номинальной нагрузкой и давлением воздуха в шине.

Функции коррекции коэффициентов сопротивления качению шины $k_{ш}$ и деформации грунта $k_{г}$ могут быть представлены как произведение частных функций коррекции:

$$k_{ш} = k_{шR_z} k_{шp_w} k_{шM_k} k_{шυ}, \tag{23}$$

где $k_{шR_z}$ — частная функция коррекции коэффициента сопротивления качению, учитывающая изменение нагрузки R_z; $k_{шp_w}$ — частная функция коррекции коэффициента сопротивления качению, учитывающая изменение давления воздуха в шине p_w; $k_{шM_k}$ — частная функция коррекции коэффициента сопротивления качению, учитывающая передачу колесом крутящего момента M_k; $k_{шυ}$ — частная функция коррекции коэффициента сопротивления качению, учитывающая влияние скорости движения υ;

$$k_{г} = k_{гR_z} k_{гp_w} k_{гM_k} k_{гn}, \tag{24}$$

где $k_{гR_z}$ — частная функция коррекции коэффициента сопротивления деформации грунта, учитывающая изменение нагрузки R_z; $k_{гp_w}$ — частная функция коррекции коэффициента сопротивления деформации грунта, учитывающая изменение воздуха в шине p_w; $k_{гM_k}$ — частная функция коррекции коэффициента сопротивления деформации грунта, учитывающая передачу колесом крутящего момента M_k; $k_{гn}$ — частная функция коррекции коэффициента сопротивления деформации грунта, учитывающая номер прохода колеса по грунту.

В соответствии с принятой расчетной схемой для прямолинейного поступательного перемещения автосамосвала, исходя из принципа д'Аламбера получим уравнение его поступательного движения:

$$T_{\Sigma} = T_{ск} + m_{а} V'_{д}, \tag{25}$$

где $T_{\Sigma} = T_1 + T_2 + T_3$ — суммарная сила тяги колесных движителей; $T_{ск}$ — продольная составляющая сил сопротивления: $T_{ск} = f_{ск}(t)$; $m_{а}$ — масса автосамосвала; $V'_{д}$ — ускорение поступательного движения автосамосвала (первая производная действительной скорости по времени).

Подставим значения T_{Σ}, $T_{ск}$ в уравнение движения (25) и получим:

$$\begin{aligned} &R_1 a_{\delta_1} \operatorname{arctg}\left(b_{\delta 1} \frac{1 - V_{д1}}{V_{T_1}}\right)^{c_{\delta 1}} + \\ &+ R_2 a_{\delta_2} \operatorname{arctg}\left(b_{\delta_2} \frac{1 - V_{д2}}{V_{T_2}}\right)^{c_{\delta 2}} + \\ &+ R_3 a_{\delta_3} \operatorname{arctg}\left(b_{\delta_3} \frac{1 - V_{д3}}{V_{T_3}}\right)^{c_{\delta 3}} = f_{ск}(t) + m_a V'_{д}. \end{aligned} \tag{26}$$

С учетом выражений (4 и 9) получим:

$$R_3 a_{\delta_1} \operatorname{arctg}\left(b_{\delta 1} \frac{1-V_{Д_1}}{V_{T_{1\max}} - a_M \left(b_M M_1\right)^{C_M} - d_M M_1 \omega_e / \omega_{ен}}\right)^{c_{\delta_1}} + \\ + R_2 a_{\delta_2} \operatorname{arctg}\left(b_{\delta_2} \frac{1-V_{д_2}}{r_{c_2}\omega_e / i_{мп}}\right)^{c_{\delta_2}} + R_3 a_{\delta_3} \operatorname{arctg}\left(b_{\delta_3} \frac{1-V_{д_3}}{r_{c_3}\omega_e / i_{мп}}\right)^{c_{\delta_3}} = f_{ск}(t) + m_a V'_д. \quad (27)$$

Уравнение движения двигателя и трансмиссии в соответствии с принципом д'Аламбера имеет вид:

$$M_e = M_c + I_{и.дв}\omega'_e, \quad (28)$$

где M_e — крутящий момент на коленчатом валу двигателя; M_c — момент сопротивления, приведенный к коленчатому валу двигателя:

$$M_c = M_1 + M_2 + M_3, \quad (29)$$

при этом:

$$M_1 = P_{K_1} r_{c_1} / i_{мсо}\eta_{мсо} i_{дп}\eta_{дп}; \quad (30)$$

$$M_2 = P_{K_2} r_{c_2} / i_{мп}\eta_{мп}; \quad (31)$$

$$M_3 = P_{K_3} r_{c_3} / i_{мп}\eta_{мп}, \quad (32)$$

где $I_{и.дв}$ — момент инерции вращающихся частей двигателя и жестко связанных с ними частей трансмиссии, приведенных к коленчатому валу двигателя; ω'_e — частота вращения коленчатого вала двигателя.

Подставим значения M_1, M_2, M_3 и ω_e в уравнение движения и получим:

$$M_e = \frac{\left(T_1 + f_{k_1} R_1\right) r_{c_1}}{i_{мсо}\eta_{мсо} i_{дп}\eta_{дп}} + \frac{\left(T_2 + f_{k_2} R_2\right) r_{c_2}}{i_{мп}\eta_{мп}} + \frac{\left(T_3 + f_{k_3} R_3\right) r_{c_3}}{i_{мп}\eta_{мп}} + I_{и.дв}\omega'_e. \quad (33)$$

Выразив T_1, T_2 и T_3 из выражения (33), получим:

$$M_e = \frac{\left(a_{\delta_1} \operatorname{arctg}\left(b_{\delta_1} \frac{1-V_{Д_1}}{V_{T_{1\max}} - a_M \left(b_M M_1\right)^{C_M} - d_M M_1 \omega_e / \omega_{ен}}\right)^{c_{\delta_1}}\right) R_1 r_{c_1}}{i_{мсо}\eta_{мсо} i_{дп}\eta_{дп}} + \\ + \frac{\left(a_{\delta_2} \operatorname{arctg}\left(b_{\delta_2} \frac{1-V_{Д_2}}{r_{c_2}\omega_e / i_{мп}}\right)^{c_{\delta_2}}\right) R_2 r_{c_2}}{i_{мп}\eta_{мп}} + \frac{\left(a_{\delta_3} \operatorname{arctg}\left(b_{\delta_3} \frac{1-V_{Д_3}}{r_{c_3}\omega_e / i_{мп}}\right)^{c_{\delta_3}}\right) R_3 r_{c_3}}{i_{мп}\eta_{мп}} + \\ + I_{и.дв}\left(\omega_{ex} - bM_e - dc^{k(M_e - M_{e\max})}\right)'. \quad (34)$$

Решение полученных дифференциальных уравнений заключается в их интегрировании и нахождении значений требуемых параметров.

Для решения дифференциальные уравнения нужно привести к виду $x' = F(x_1 t)$, т. е. нам необходимо найти первые производные параметров $V_д$ и ω_e и решить систему:

$$\begin{cases} V'_\partial = F_\partial\left(t, V_\partial, \omega_e\right) \\ \omega'_e = F_\omega\left(t, V_\partial, \omega_e\right) \end{cases}. \quad (35)$$

Выразим V'_∂ и ω'_e из полученных уравнений движения (26 и 33):

$$V'_{д} = \left(\begin{array}{l} R_1 a_{\delta_1} \operatorname{arctg}\left(b_{\delta_1} \dfrac{1 - V_{Д_1}}{V_{T_{1\max}} - a_M \left(b_M M_1\right)^{C_M} - \dfrac{d_M M_1 \omega_e}{\omega_{ен}}} \right)^{c_{\delta_1}} + \\ R_2 a_{\delta 2} \operatorname{arctg}\left(b_{\delta 2} \dfrac{1 - V_{д_2}}{r_{c_2}\omega_e / i_{мп}} \right)^{c_{\delta 2}} + R_3 a_{\delta_3} \operatorname{arctg}\left(b_{\delta_3} \dfrac{1 - V_{д_3}}{r_{c_3}\omega_e / i_{мп}} \right)^{c_{\delta_3}} - f_{ск}(t) \end{array} \right) \Bigg/ m_а ;$$

$$\omega'_e = \left(\begin{array}{l} M_e - \dfrac{\left(a_{\delta_1} \operatorname{arctg}\left(b_{\delta_1} \dfrac{1 - V_{Д_1}}{V_{T_{1\max}} - a_M \left(b_M M_1\right)^{C_M} - \dfrac{d_M M_1 \omega_e}{\omega_{ен}}} \right)^{c_{\delta_1}} \right) R_1 r_{c_1}}{i_{мсо}\eta_{мсо} i_{дп}\eta_{дп}} - \\ \dfrac{\left(a_{\delta_2} \operatorname{arctg}\left(b_{\delta_2} \dfrac{1 - V_{Д_2}}{r_{c_2}\omega_e / i_{мп}} \right)^{c_{\delta_2}} \right) R_2 r_{c_2}}{i_{мп}\eta_{мп}} - \dfrac{\left(a_{\delta_3} \operatorname{arctg}\left(b_{\delta_3} \dfrac{1 - V_{д_3}}{r_{c_3}\omega_e / i_{мп}} \right)^{c_{\delta_3}} \right) R_3 r_{c_3}}{i_{мп}\eta_{мп}} \end{array} \right) \Bigg/ I_{и.дв} . \qquad (36)$$

При решении этой системы дифференциальных уравнений необходимо соблюдать условие $V_{\partial 1} = V_{\partial 2} = V_{\partial 3}$ и ограничения $V_{\partial i} \geqslant 0$, $M_e \leqslant M_{e\max}$.

Полученная система дифференциальных уравнений с приведенными условиями и ограничениями представляет собой математическую модель автосамосвала с комбинированным тяговым приводом с принятыми допущениями.

Приведение полученной системы уравнений (36) к алгебраическому виду представляет значительные трудности из-за того, что в них присутствуют зависимости, являющиеся трансцендентными уравнениями.

Поэтому реализация разработанной математической модели произведена с использованием программного продукта Matlab в пакете Simulink.

Анализ полученных результатов

Проверка адекватности математической модели проводилась сравнением теоретически полученных характеристик с экспериментально полученными в сопоставимых условиях движения (рис. 2). В качестве объекта экспериментальных исследований использовался автомобиль-самосвал Урал-55571-0021-30. Автомобиль оснащался

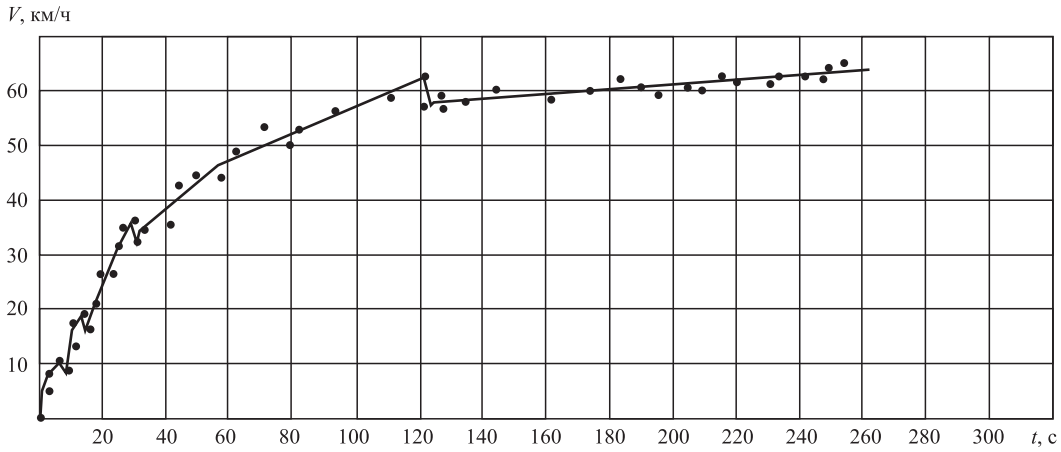

Рис. 2. Разгон груженого автомобиля-самосвала с комбинированным приводом на дороге с асфальтовым покрытием:

—— — расчетный; • — эксперимент

экспериментальным активным подключаемым гидравлическим приводом переднего моста.

Как было установлено, относительная погрешность моделирования в данном случае не превышает 15 %, что позволяет сделать вывод о том, что математическая модель движения автомобиля с доверительной вероятностью 0,95 хорошо описывают исследуемые процессы в указанных пределах варьирования факторов для решения практических задач модернизации автомобиля.

Заключение

Структура математической модели движения автомобиля позволяет анализировать движение автомобиля-самосвала с комбинированным тяговым приводом.

Математическая модель автомобиля-самосвала описывает процессы, происходящие в комбинированном приводе автосамосвала, и позволяет оценить эффективность совместной работы механического и гидравлического приводов ведущих мостов, также можно расчетным путем определить значения оценочных показателей.

По результатам численного и натурного экспериментов достигнута удовлетворительная для математической модели точность расчета. Полученные результаты могут быть использованы при исследовании эксплуатационных свойств автомобильной техники.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Баженов С. П.** Динамическая нагруженность трансмиссии трактора / С. П. Баженов, М. П. Куприянов. — Липецк: ЛГТУ. 1997. — 189 с.
2. **Докшин И. В., Келлер А. В., Гусев С. А.** Какой он современный автомобиль-самосвал? // Строительные и дорожные машины. — 2017. — № 1. — С. 21—29.
3. **Иванищев П. И.** Определение тяговых качеств колесного движителя, загруженного стационарными возмущениями. — Дис. ... канд. техн. наук. — Воронеж, 1978.
4. **Кетков Ю. Л.** MATLAB 6.x: программирование численных методов. — СПб.: БХВ-Петербург, 2004. — 662 с.
5. **Комплексная** оценка эффективности методов распределения мощности в механических трансмиссиях / А. В. Келлер, И. А. Мурог, Д. В. Шафиков, В. Ю. Усиков, С. В. Ушнурцев // Автомобильная промышленность. — 2013. — № 4. — С. 14—17.
6. **К задаче** распределения мощности между колесами мобильной машины / А. В. Келлер, Б. М. Позин, И. П. Трояновская, В. Н. Бондарь, А. А. Юсупов // Тракторы и сельхозмашины. — 2015. — № 3. — С. 10—12.
7. **Келлер А. В.** Методологические принципы оптимизации распределения мощности между движителями колесных машин / А. В. Келлер // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. — 2006. — № 11 (66). — С. 96—101.
8. **Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике для научных работников и инженеров. — М.: Наука, 1984. — 832 с.
9. **Кутьков Г. М.** Тракторы и автомобили. Теория и технологические свойства: учебник: допущено УМО. — М.: Колосс, 2004. — 502 с.
10. **Навроцкий К. Л.** Математическое моделирование гидро- и пневмоприводов // Строительные и дорожные машины. — 2005. — № 12. — С. 30—32.
11. **Степнов М. Н.** Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник. — М.: Машиностроение, 1985. — 232 с.
12. **Серов А. А.** Определение рациональных параметров комбинированного тягового привода автогрейдеров. — Дис. ... канд. техн. наук. — Воронеж, 2011.
13. **Keller A. V., Anchukov V. V., Gorelov V. A.** Modeling truck driveline dynamic loads at differential locking unit engagement // Procedia Engineering. — 2015. — Т. 129. — С. 280—287.

УДК 629.114

В. В. Геращенко, канд. техн. наук, доцент, **В. П. Лобах,** канд. техн. наук, доцент,
Н. А. Коваленко, канд. техн. наук, доцент, **О. В. Билык,** канд. техн. наук, доцент,
МОУВО "Белорусско-Российский университет"
E-mail: mogilev-kovalenko@rambler.ru

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДАТЧИКА ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ВАЛОВ АВТОМОБИЛЯ

Предложена методика проектирования датчика частоты вращения валов автомобильных агрегатов с учетом режимов их вращения. Приведен пример выполнения расчетов.

Ключевые слова: *вал, частота вращения, датчик, диски с выступами и впадинами, катушка индуктивности, импульс напряжения, дифференцирующая и интегрирующая цепи, статическая характеристика датчика.*

The method of designing the shaft speed sensor of automobile units taking into account their rotation modes is offered. An example of calculations is given.

Keywords: *shaft, speed, sensor, disks with protrusions and depressions, inductor, voltage pulse, differentiating and integrating circuits, static characteristic of the sensor.*

Эффективность работы автомобиля оценивается его производительностью, которая зависит от его скоростных свойств, и определяется она в том числе и частотой вращения валов, колес и т. д., которую необходимо измерять в процессе работы автомобиля и передавать в систему управления для выбора оптимального режима движения (например, для предотвращения перегрузки двигателя путем своевременного переключения передач на более низшую по отношению к исходной). Кроме того, частота вращения может использоваться при диагностировании различных агрегатов на стендах (например, при определении технического состояния коробок передач по их кпд, определении технического состояния ДВС по развиваемой мощности и др.).

Таким образом, для измерения частоты вращения необходим датчик, обладающий простотой, дешевизной, надежностью и точностью. Конструкция и методика проектирования такого датчика предлагается в данной работе.

Для датчика частоты вращения важнейшей характеристикой является статическая, т. е. зависимость выходного напряжения от частоты вращения вала. Она должна быть линейной (рис. 1).

На рис. 2 представлена схема предлагаемого датчика частоты вращения вала, разработанных авторами, а на рис. 3 — его общий вид.

Работает датчик следующим образом. При периодическом вхождении выступов и впадин диска в зазор индуктивного щелевого преобразователя (ПИЩ)

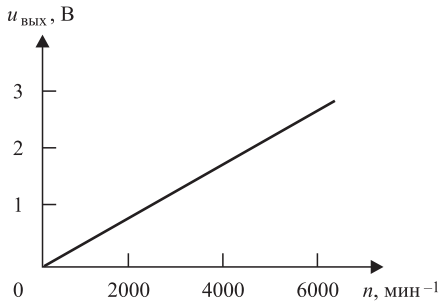

Рис. 1. Статическая характеристика датчика частоты вращения

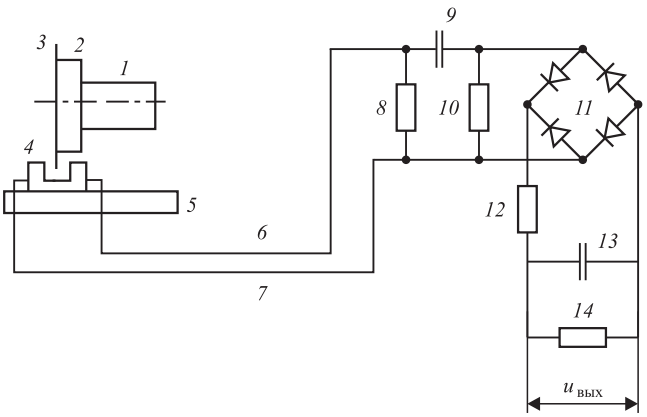

Рис. 2. Схема датчика частоты вращения вала:

1 — вал; *2* — шкив; *3* — металлический диск с выступами и впадинами; *4* — преобразователь ПИЩ; *5* — кронштейн; *6*, *7* — электрические провода; *8*, *10*, *12* — резисторы; *9*, *13* — конденсаторы; *11* — выпрямитель

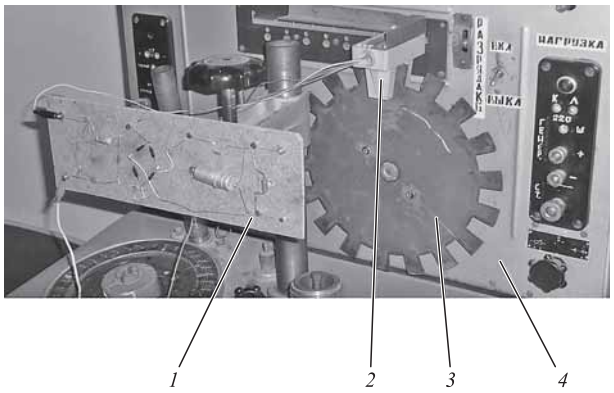

Рис. 3. Датчик частоты вращения:

1 — преобразователь импульсов; *2* — преобразователь ПИЩ; *3* — металлический диск с выступами и впадинами; *4* — стенд

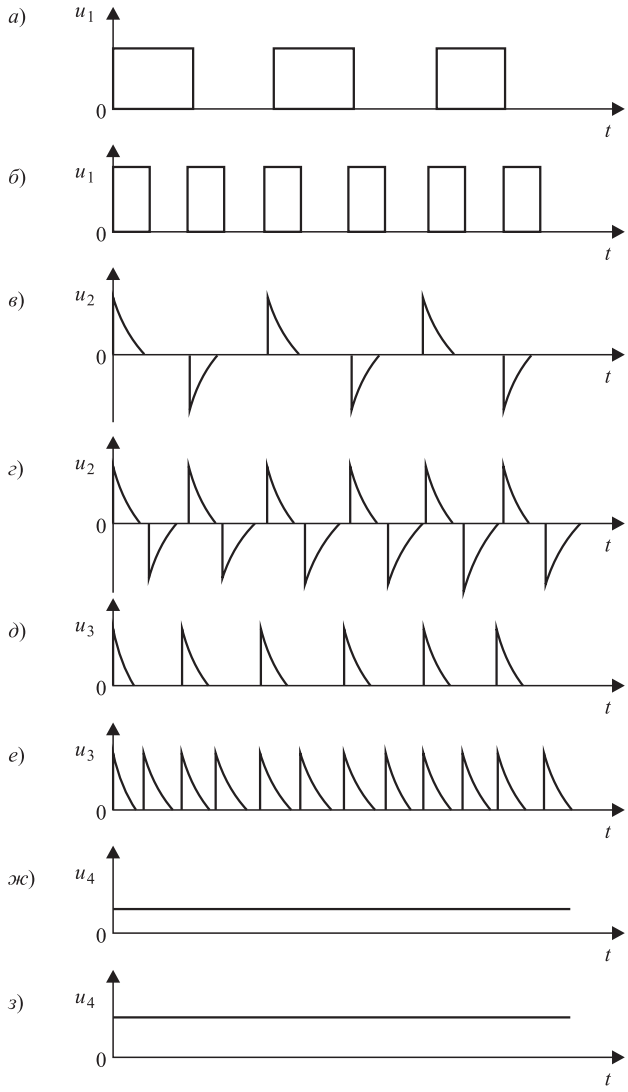

Рис. 4. Графики сигналов в цепях датчика частоты вращения

формируются периодические импульсные процессы, состоящие из прямоугольных импульсов одинаковой высоты (рис. 4, *а* и 4, *б*). Все прямоугольные импульсы имеют одинаковую высоту, не зависящую от частоты вращения диска, и равную напряжению питания преобразователя ПИЩ. С увеличением же частоты вращения вала, например, в два раза, от 2000 мин$^{-1}$ (рис. 4, *а*) до 4000 мин$^{-1}$ (рис. 4, *б*), длительность импульсов уменьшается в два раза, а частота следования импульсов возрастает в два раза.

Прямоугольные импульсы с резистора *8* поступают на дифференцирующую цепь, состоящую из конденсатора *9* и резистора *10* (см. рис. 2). На резисторе *10* формируются экспоненциальные импульсы, изображенные на рис. 4, *в* и 4, *г*. После выпрямления выпрямителем *11* импульсы становятся однополярными (рис. 4, *д* и 4, *е*). После интегрирования с помощью резистора *12* и конденсатора *13* на выходном резисторе *14* возникает непрерывный аналоговый сигнал (рис. 4, *ж* и 4, *з*), пропорциональный частоте вращения вала, равной 2000 мин$^{-1}$ и 4000 мин$^{-1}$.

Таким образом, графики рис. 4, *а*, 4, *в*, 4, *д*, 4, *ж* соответствуют частоте вращения вала, равной 2000 мин$^{-1}$, а графики рис. 4, *б*, 4, *г*, 4, *е*, 4, *з* — 4000 мин$^{-1}$.

Так как основной операцией для создания импульсных датчиков частоты вращения является операция интегрирования, то при интегрировании последовательности прямоугольных импульсов напряжения (рис. 5, *а*), формируемого на резисторе *8* (см. рис. 2), например, при частоте вращения 2000 мин$^{-1}$, и при интегрировании последовательности прямоугольных импульсов напряжения, полученного на этом же резисторе при частоте вращения 4000 мин$^{-1}$ (см. рис. 5, *б*), получим одинаковое по уровню выходное напряжение $U_{вых}$ (рис. 5, *в* и 5, *г*) при разной частоте вращения вала (рис. 5, *а* и 5, *б*).

Поэтому для соблюдения линейности статической характеристики датчика необходимо ввести такую цепь, которая формирует из прямоугольных импульсов при различной частоте вращения вала одинаковые по площади импульсы, например, экспоненциальные (см. рис. 4). Такой цепью является дифференцирующая, состоящая из конденсатора *9* и резистора *10*, на вход которой поступают прямоугольные импульсы напряжения разной площади с резистора *8* (см. рис. 2), а на выходе дифференцирующей цепи формируются экспоненциальные импульсы напряжения одинаковой площади (см. рис. 4) при различных частотах вращения вала.

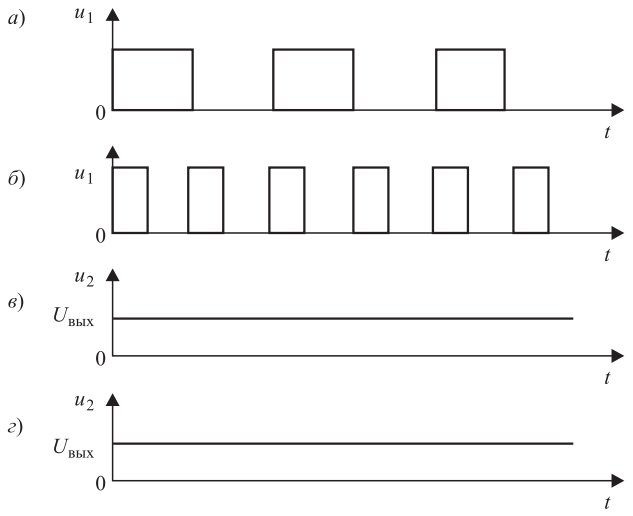

Рис. 5. Графики сигналов датчика частоты вращения без дифференцирующей цепи

Для обеспечения достаточной точности преобразования частоты вращения вала в пропорциональное ей напряжение на выходе датчика, т. е. обеспечения линейности его статической характеристики (см. рис. 1), необходимо дифференцирующую цепь выполнить с определенной постоянной времени. От правильности выбора постоянной времени обеспечивается заданная точность преобразования дифференцирующей цепью прямоугольных импульсов в экспоненциальные при различных частотах вращения вала, а интегрирующей цепью — точность преобразования экспоненциальных импульсов в непрерывный уровень напряжения на выходе датчика. В настоящее время отсутствуют методики выбора постоянной времени дифференцирующей и интегрирующей цепей для этого датчика.

Предлагается для дифференцирующей цепи выбор постоянной времени производить для максимально возможной частоты вращения вала, так как при этом для других частот линейность статической характеристики будет обеспечена. Объясняется это тем, что при максимальной частоте вращения вала в датчике формируются прямоугольные импульсы минимальной длительности, а экспоненциальные импульсы напряжения на выходе дифференцирующей цепи должны быть равны этой длительности при нулевом напряжении. Поэтому, исходя из практических соображений, выбираем постоянную времени для дифференцирующей цепи в пять раз меньше длительности положительного прямоугольного импульса при максимальной частоте вращения, что объясняется практически равенством продолжительности преобразования прямоугольных импульсов в экспоненциальные.

Рассмотрим порядок преобразования входящих прямоугольных импульсов через дифференцирующую цепь датчика (рис. 6), состоящую из конденсатора емкостью *C* и резистора сопротивлением *R*.

Основным параметром дифференцирующей цепи является ее постоянная времени *T* (рис. 7), которая определяется как промежуток времени, за который закончился бы переходной процесс изменения напряжения на выходе дифференцирующей цепи при появлении напряжения на входе дифференцирующей цепи. Для ее графического определения необходимо провести касательную к началу экспоненциального импульса напряжения на выходе дифференцирующей цепи до пересечения этой касательной с осью *t* в точке *A* и она равна отрезку 0—*A* оси абсцисс.

Изменение напряжения $u_{вых}$ на выходе дифференцирующей цепи называется переходной характеристикой (рис. 8) и определяется из формулы [1]:

$$u_{вых} = Ri_c = RC\frac{du_c}{dt} = T\frac{du_c}{dt}, \qquad (1)$$

где i_c — сила тока, протекающего через конденсатор *A*.

Решением этого дифференциального уравнения, составленного для изменения выходного напряжения (штрихпунктирная линия на рис. 7) дифференцирующей цепи (см. рис. 6), является:

$$u_{вых} = U_{вх}e^{-\frac{t}{T}}, \qquad (2)$$

где *e* — основание натурального логарифма, равное 2,72; *T* — постоянная времени, с; $U_{вх}$ — высота прямоугольного импульса напряжения, В.

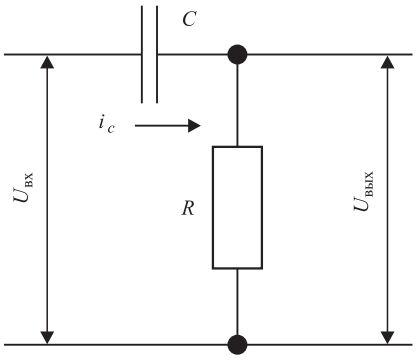

Рис. 6. Дифференцирующая цепь

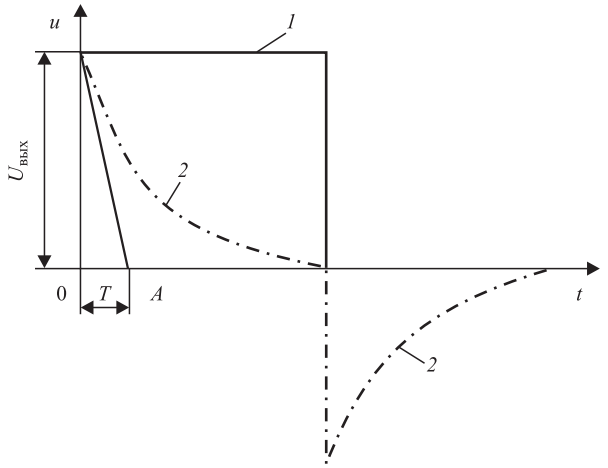

Рис. 7. Графики изменения напряжения на входе (*1*) и выходе (*2*) дифференцирующей цепи

Рассчитанные по формуле (2) значения представлены в таблице и используются для построения переходной характеристики (см. рис. 8) дифференцирующей цепи.

Данные для построения переходной характеристики дифференцирующего звена

t/T	0	1	2	3	4	5
$u_{вых}$	1	0,37	0,14	0,05	0,02	0,007

Приведем пример расчета параметров элементов дифференцирующей цепи для датчика с количеством выступов, равным 36, и частоте вращения вала 3600 мин$^{-1}$.

Определим длительность импульса:

$$\Delta t = 1/(60 \cdot 36 \cdot 2) = 0{,}00023 \text{ с}.$$

Постоянная времени равна:

$$T = 0{,}00023/5 = 0{,}000046 \text{ с}.$$

Определим из выражения для расчета постоянной времени $T = CR$ дифференцирующей цепи, задав сопротивление резистора $R = 10^4$ Ом, емкость конденсатора C:

$$C = T/R = 0{,}000046/10^4 = 4{,}6 \cdot 10^{-8} \text{ Ф} = 460 \text{ мкФ}.$$

Далее для преобразования экспоненциальных положительных импульсов дифференцирующей цепи в непрерывное изменяющееся напряжение, уровень которого пропорционален частоте вращения вала (см. рис. 4, *ж* и 4, *з*) в любой момент времени, применяем интегрирующую цепь (рис. 9).

Интегрирующую цепь необходимо выбирать с определенной постоянной времени, которая должна быть больше длительности интегрируемых экспоненциальных импульсов напряжения на нулевом уровне в 5—10 раз [2] при минимально возможной частоте вращения вала. Это объясняется следующим. Интегрирование экспоненциальных импульсов с помощью интегрирующей *RC*-цепи сопровождается погрешностью, а в дифференцирующем уравнении (1) интегрируется разность входных и выходных напряжений цепи при необходимости интегрирования только входного напряжения. Поэтому для достижения требуемой погрешности интегрирования необходимо увеличить постоянную времени интегрирующей цепи, что возможно при увеличении длительности интегрируемых экспоненциальных импульсов напряжения на нулевом уровне в 5—10 раз [2] при минимально возможной частоте вращения.

Переходная характеристика интегрирующей цепи определяется по формуле (3). Решение этого дифференциального уравнения представлено в формуле (4). Результаты расчета показаны на рис. 10.

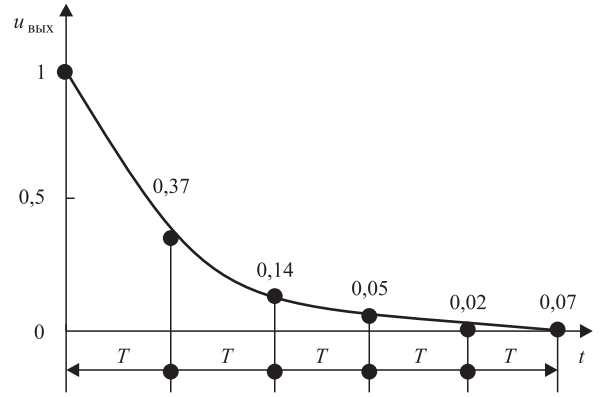

Рис. 8. Переходная характеристика дифференцирующей цепи

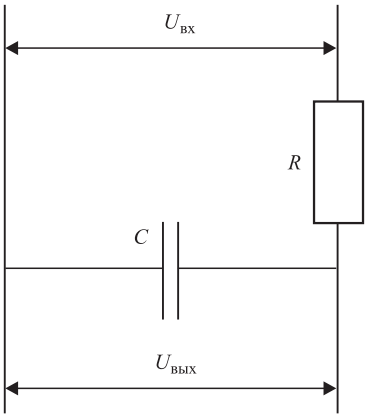

Рис. 9. Интегрирующая цепь

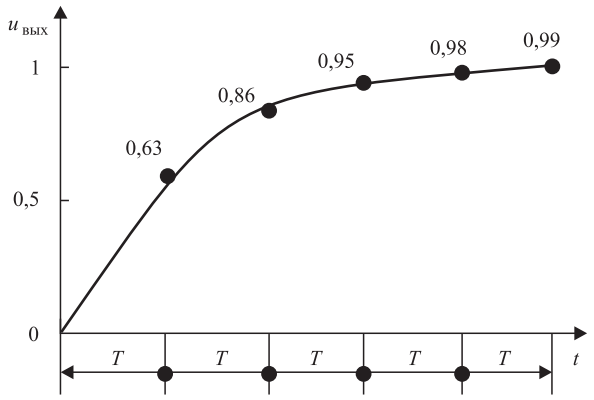

Рис. 10. Переходная характеристика интегрирующей цепи

$$u_{вых} = U_{вх}\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right); \quad (3)$$

$$u_{вых} = \frac{1}{RC}\int_0^t \left(U_{вх} - U_{вых}\right) dt. \quad (4)$$

Таким образом, на выходе разработанного авторами датчика частоты вращения вала формируются напряжения, уровень которых пропорционален частоте вращения вала (см. рис. 4).

Выводы по работе

1. Разработана методика проектирования датчика частоты вращения валов с большим диапазоном изменения частот вращения валов — от 500 до 7000 мин$^{-1}$. Такой датчик может использоваться для измерения частот вращения коленчатых валов двигателя внутреннего сгорания, валов трансмиссии, колес автомобиля.

2. Спроектирован и изготовлен по разработанной методике датчик частоты вращения вала. Испытания и широкое применение разработанного датчика на автомобильном транспорте [3—8] подтвердили его работоспособность и линейность его статической характеристики при переменных частотах вращения вала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Фельдбаум А. А., Бутковский А. Г.** Методы теории автоматического управления. — М.: Наука, 1971. — 744 с.
2. **Гусев В. Г., Гусев Ю. М.** Электроника. — М.: Высшая школа, 1991. — 418 с.
3. **Геращенко В. В., Коваленко В. В., Лобах В. П.** Методы и средства диагностирования и повышения эксплуатационных свойств автомобилей и их агрегатов: монография. — Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2017. — 170 с.
4. **Усовершенствованная** система автоматического управления скоростью движения автомобиля / В. В. Геращенко, Н. А. Коваленко, А. В. Щур, В. И. Гуменюк // Автомобильная промышленность. — 2017. № 2. — С. 11—13.
5. **Лобах В. П., Геращенко В. В., Коваленко Н. А.** Устройство автоматической блокировки межколесного дифференциала колесного трактора // Тракторы и сельхозмашины. — 2017. — № 7. — С. 3—7.
6. **Усовершенствованный** регулятор тормозных сил / В. В. Геращенко, В. П. Лобах, В. Д. Рогожин, А. А. Метто // Автомобильная промышленность. — 2012. — № 6. — С. 16—18.
7. **Патент № 21662 РБ,** МПК B 60T 17/22. Устройство для бортового диагностирования тормозной системы автомобиля / В. В. Геращенко, Н. А. Коваленко, В. П. Лобах. — Опубл. 28.02.2018.
8. **Лобах В. П., Геращенко В. В., Коваленко Н. А.** Догружатель автопоезда // Грузовик. — 2018. — № 12. — С. 7—10.

УДК 658.53

Х. А. Фасхиев, д-р техн. наук, профессор кафедры прикладной гидромеханики, ФГБОУ ВО "Уфимский государственный авиационный технический университет", профессор кафедры экономики, менеджмента и маркетинга, Уфимский филиал финансового университета при Правительстве Российской Федерации
E-mail: faskhiev@ mail.ru

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД — БУДУЩЕЕ АВТОТРАНСПОРТА. ЧАСТЬ 2

Проведен анализ проблем развития подвижного состава на автомобильном транспорте, преимущества и недостатки автотранспорта на газомоторном топливе и на электрической тяге. Отмечено, что для массового перехода автомобилей на электрическую тягу имеются веские основания. По экологичности электромобили за полный жизненный цикл превосходят автомобили на нефтяном топливе. Сравнительный анализ экономической эффективности легковых и грузовых электромобилей с автомобилями того же класса, оснащенными двигателями внутреннего сгорания, показал, что электромобили уже сейчас в эксплуатации более выгодны, несмотря на их дороговизну. Установлено, что совокупная стоимость владения электромобилей за жизненный цикл меньше, чем у автомобилей на нефтяном топливе. Сделан вывод о том, что электрификация автомобилей может в корне изменить установившийся порядок целых отраслей экономики.

Ключевые слова: *автомобиль, электромобиль, экология, вредные выбросы, газомоторное топливо, электроэнергия, цена, экономичность.*

The analysis of the problems of the development of rolling stock in road transport, the advantages and disadvantages of vehicles on gas engine fuel and on electric propulsion has been carried out. It is noted that there are good reasons for the mass transition of cars to electric traction. In terms of environmental friendliness, electromobiles for a full life cycle are superior to vehicles on oil fuel. A comparative analysis of the economic efficiency of passenger cars and cargo electric vehicles with cars of the same class equipped with internal combustion engines showed that electric vehicles are already more profitable in operation, despite their high cost. It is established that the total cost of ownership of electric vehicles for the life cycle is less than that of cars on oil fuel. It is concluded that the electrification of cars can radically change the established order of entire sectors of the economy.

Keywords: *automobile, electric vehicle, ecology, harmful emissions, gas engine fuel, electric power, price, profitability.*

Газ как моторное топливо

Одним из возможных способов снижения давления на окружающую среду со стороны транспорта является расширение использования газа в роли моторного топлива. В природе имеются большие запасы природного газа. Доказанные запасы газа в мире составляют около 187 трлн м^3 (табл. 1), сюда еще можно прибавить не открытые запасы, которые по расчетам превышают 120 трлн м^3 и метан угольных пластов, запасы которого оцениваются в 240 трлн м^3. Доля России в мировых запасах природного газа составляет около 18 %. В настоящее время около 25 млн автомобилей в мире (1,5 % парка) в роли моторного топлива используют газ. Рынок газомоторного топлива на 90 % состоит из пропан-бутана и на 10 % — из метана. Прирост газомоторной техники в мире составляет около 25 % в год.

В России в 2018 г. эксплуатировалось около 246 тыс. газовых и битопливных автомобилей (0,5 % парка). Из них около 127 тыс. легковые автомобили, 105 тыс. грузовые, 14 тыс. автобусы. Правда, эксперты отмечают, что автомобилей на газомоторном топливе гораздо больше, так как в России только крупные производители баллонов под сжиженный углеводородный газ (СУГ) суммарно выпускают до 60 тыс. единиц продук-

Таблица 1

Первые 8 стран по разведанным запасам топливных ресурсов*

Страна	Уголь, млрд т	Страна	Нефть, млрд барр.	Страна	Природный газ, трлн м^3
1. США	237	1. Венесуэла	298	1. Иран	34
2. Россия	157	2. Саудовская Аравия	268	2. Россия	33
3. Китай	115	3. Канада	173	3. Катар	21
4. Австралия	76	4. Иран	155	4. Туркмения	17
5. Индия	61	5. Ирак	141	5. США	9
6. Германия	40	6. Кувейт	104	6. Саудовская Аравия	8
7. Украина	34	7. ОАЭ	98	7. Венесуэла	5
8. Казахстан	34	8. Россия	80	8. Нигерия	5
Мировые запасы	860	Мир	236 млрд т	Мир	187
Годовая добыча	3,7	Мир	3,6 млрд т	Мир	3,6
Ресурсообеспеченность, лет	400	Мир	55	Мир	70
* US Energy International Administration. International Energy Outlook, 2013					

ции в месяц, и практически все они реализуются. По оценкам, до 90 % владельцев не регистрируют перевод своих автомобилей на газ [6]. К 2020 г. прогнозируется рост газовых автомобилей до 370 тыс. единиц (рис. 4). По прогнозу Международного газового союза, к 2020 г. парк газового автотранспорта в мире увеличится до 50, а к 2030 г. — до 100 млн транспортных средств (6 % парка).

Транспорт на газовом топливе позволяет сократить выбросы в атмосферу сажи, высокотоксичных ароматических углеводородов, окиси углерода, непредельных углеводородов и окислов азота. Токсичность выхлопных газов при работе на компримированном газе (КПГ) на 60 % ниже токсичности выхлопных газов бензиновых двигателей.

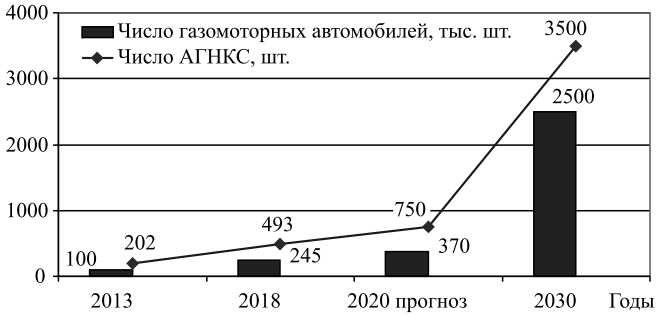

Рис. 4. Динамика парка газомоторных автомобилей и АГНКС в России

Применение природного газа вместо бензина обеспечивает снижение содержания в выхлопных газах окиси углерода с 1,3 до 0,13 %, углеводородов с 221 до 88 млн долей, а окислов и соединений азота с 1000 и более до 100...200 млн долей. Дымность выхлопа в режиме свободного ускорения при работе на газовом топливе в 3 раза ниже, чем при работе на бензине [1].

Газ в роли моторного топлива, прежде всего, привлекателен с коммерческой точки зрения. Природный газ для применения в качестве моторного топлива не требует глубокой переработки, достаточна его очистка от воды и примесей, тогда как для получения бензина и дизельного топлива требуется дорогостоящая переработка нефти. При одинаковой энергетической ценности 1 м^3 газа в 2—2,5 раза дешевле 1 литра бензина. Так, в начале 2019 г. 92-й бензин в среднем стоил 42 руб. за литр, а КПГ продавался по цене 16 руб/м^3, т. е. в 2,6 раза дешевле. Кроме того, цены на газомоторное топливо повышаются с более низкими темпами, чем на нефтяное топливо. Так, за 2014—2018 гг. цена на дизельное топливо повысилась на 22,4 %, бензин АИ-95 — на 20,4 %, газомоторное топливо — на 11,2 %.

Затраты на приобретение и установку газобаллонного оборудования (ГБО) за счет получаемой экономии на топливо у легковых автомобилей окупаются в среднем за 50...60 тыс. км пробега,

т. е. за 2—3 года. Кроме того, применение газомоторного топлива решает проблему слива топлива: нет необходимости в дорогостоящей аппаратуре слежения.

Октановое число у природного газа на 12...15 ед. больше, чем у бензина. В результате уровень шума двигателя снижается на 7...9 децибел, что важно в условиях города. Коэффициент полезного действия (кпд) газовых двигателей составляет 35...38 %, тогда как у бензинового двигателя — 32...35 %. Кроме экологической чистоты, метан не образует нагар на поршнях, клапанах и свечах зажигания, не смывает масляную пленку со стенок цилиндров, благодаря чему уменьшаются эксплуатационные расходы.

В расчете на богатые запасы газа Россия взяла стратегический курс на газификацию транспорта. Постановление правительства РФ № 767-р от 13 мая 2013 года предусматривало перевод на газомоторное топливо в 15 российских городах с населением более 1 млн жителей до 50 % общественного транспорта, в городах с населением более 300 тыс. человек — до 30 %, для городов с населением более 100 тыс. человек — до 10 %. Созданной для реализации проекта газификации транспорта компании "Газпром газомоторное топливо" предстоит формировать заправочную инфраструктуру и повысить доступность автомобильных газонаполнительных компрессорных станций (АГНКС). Министерство транспорта России разработало программу расширения использования газа в качестве моторного топлива на транспорте на 2018—2022 гг. Затраты на программу составляют 769,6 млрд руб., из них 163 млрд руб. бюджетные средства. В рамках этой программы предусмотрено:

— обеспечение производства до 30 тыс. газомоторных автомобилей в год;

— разработка мер по стимулированию производства и эксплуатации транспортных средств на газомоторном топливе;

— перевод до 50 % общественного транспорта и техники для ЖКХ в городах с населением более миллиона жителей на газомоторное топливо;

— увеличение количества автотранспортных средств, использующих КПГ в 2,5 раза, сжатый природный газ до 4 тыс. ед.;

— снижение выбросов загрязняющих веществ на транспортное средство на 30 %;

— снижение затрат на топливо на одно транспортное средство на 12 %;

— увеличение объема потребления КПГ с 0,6 до 2,17 млрд м^3;

— увеличение количества АГНКС с 356 в 2017 г. до 1100 в 2022 г.;

— увеличение количества криогенных автозаправочных станций (стационарных и передвижных) — в 5 раз;

— заместить 25...30 % дизельного топлива газом.

Перевод транспорта на газомоторное топливо, несомненно, шаг вперед в решении экологических проблем. Однако при этом следует учесть, что газ, как моторное топливо, имеет целый ряд недостатков как в техническом, так и в коммерческом плане. Главное из них — газовый двигатель не может обеспечить "нулевые выбросы", а просто снижает их объем. По оценкам экспертов Топливного союза выбросы у бензиновых автомобилей, соответствующих требованиям Евро 5, практически такие же, как у газовых. Газовые автомобили в отдельных случаях все равно используют нефтяное топливо, например при запуске, или отсутствии возможности заправки газом. Кроме того, при применении газа в роли моторного топлива возникает ряд технических проблем. В частности, снижается мощность двигателя, повышается снаряженная масса, ГБО требует дополнительные затраты, возникают проблемы запуска двигателя в холодное время года, есть опасность взрыва газа. Октановое число у газа больше, чем у бензина, поэтому двигатель должен быть сконструирован под это октановое число. На практике часто под газомоторное топливо используют обычные двигатели, что снижает их топливную экономичность и ухудшает скоростно-силовые характеристики. При установке ГБО требуются специальные настройки, изменения в конструкции топливной системы, которые будут не оптимальны для бензина, т. е. автомобиль теряет в мощности и надежности. У газовых автомобилей в эксплуатации по причине тепловой перегруженности встречаются поломки цилиндро-поршневой группы двигателя, случаются отказы газового оборудования. Тяжелые и находящиеся под высоким давлением горючих газов баллоны увеличивают опасность газовых автомобилей. Автомобили, заправляемые пропан-бутаном, пожароопасные, а метановые — взрывоопасные, так как давление КПГ в баллонах превышает 20 МПа. Для обеспечения безопасности газовых автомобилей требуется установка современного 4-го или 5-го поколения ГБО и периодическое техническое обслуживание автомобиля в сертифицированных сервисных центрах.

Газомоторные автомобили в среднем на 10...20 % дороже дизельных, но еще требуют

дополнительно инвестировать в специальную инфраструктуру в автохозяйстве. Переоборудование бензиновых автомобилей в газовые собственнику обходится около 90 тыс. руб. Процедура перевода и получения сертификата на газовый автомобиль довольно сложна. У малолитражных автомобилей и при небольших пробегах затраты на установку ГБО, как правило, не окупаются. Кроме того, если бензиновый автомобиль был на гарантии, то при переводе на газ он лишается гарантии вне зависимости наличия сертификата сервисного центра. Естественно, эти факты сдерживают массовый перевод автомобилей на газомоторное топливо. Правда, государство принимает определенные меры по снижению финансовой нагрузки на потребителей газомоторной техники. Так, с 2013 г. производится субсидирование производителей и потребителей автобусов и коммунальной техники. Для этих целей из федерального бюджета ежегодно выделяется 3,5 млрд руб. В 2019 г. Минэнерго разработало программу "Развития рынка газомоторного топлива", в которой россиянам предусмотрены льготы при установке газобаллонного оборудования. Так, для легковых автомобилей размер субсидии предусмотрен в 27 тыс. руб., для коммерческого транспорта — 48 тыс., для автобусов до 8 м — 63 тыс., свыше 8 м — 111 тыс., грузовиков — 114 тыс., магистральных тягачей — 147 тыс. руб. Предусматривается также субсидирование части затрат на строительство и закупку коммунальной, дорожно-строительной, сельхозтехники, судов и железнодорожных локомотивов, работающих на метане. Суммарный размер субсидий на пять лет по всем направлениям проекта должен составить 187 млрд руб.

Ключевая же проблема перехода на газомоторное топливо — это потребность создания необходимой заправочной, сервисной инфраструктуры газового транспорта. Эффективная эксплуатация автомобилей на наиболее перспективном дешевом метане возможна только при наличии развитой системы заправок. Газомоторные транспортные средства сейчас эксплуатируются на коротком плече с учетом географии расположения заправок. Из-за малочисленности заправок автомобили вынуждены совершать холостые пробеги, теряя драгоценное время, и естественно деньги.

По состоянию на начало 2019 г. на территории России было всего 493 заправки компримированного природного газа (1 заправка/на 21 тыс. км^2). К 2020 г. планируется довести число АГНКС до 750. Для сравнения, число бензиновых заправок в стране превышает 29 тыс. У европейского лидера в продвижении газомоторного топлива Италии 1046 газовых заправок (1 заправка/на 300 км^2), Германии — 921 (1/400); Швеции — 154 (1/2900), США — 1123 (1/8300). Заправки в России расположены крайне неравномерно по регионам: половина заправок сконцентрирована в Центральном, Приволжском и Южном федеральных округах. Построить АГНКС стоит 1 млн долл. Число газомоторных автомобилей мало, следовательно, инвестиции на заправку в разумных сроках не окупаются. Не только для частного бизнеса, но и для "Газпрома", главного поставщика метана и инвестора в инфраструктуру газомоторного транспорта, вложения с безызвестным сроком окупаемости весьма накладны.

Программа газификации автотранспорта в России запоздала на 25—30 лет. Она была актуальна, когда в стране активно формировалась система городских АЗС, которые сейчас трудно дооснастить газозаправочным оборудованием. Даже если есть такая возможность, то инвестиции в газозаправочную инфраструктуру потребуют средства в 25...30 % стоимости АЗС. При увеличении потребителей газа не исключается быстрый рост его цены. Газомоторная техника благодаря своей экономичности имеет определенную перспективу развития в регионах с холодным климатом. В малонаселенных, отдаленных районах проблема экологии не стоит так остро, как в мегаполисах, поэтому сложившаяся ситуация потребителей автомототехники этих регионов вполне устраивает.

Энергетический базис электрификации автотранспорта

Переход с нефтяного топлива на газ кардинально не решает экологические проблемы транспорта, требует создания дорогой газомоторной инфраструктуры. Возникает вопрос: если не газомоторное топливо, то какие еще есть варианты решения проблемы экологии транспорта? Альтернатива общеизвестна — электромобилизация, а газ использовать для генерации электроэнергии и тепла в теплоэлектроцентралях (ТЭЦ). Начиная с начала XXI века во всем мире активизировалась НИОКР в области электрического транспорта, а газовая тематика начала отходить на второй план. Причиной этому послужило появление в 90-е годы XX века легких, энергоемких, пригодных к многоцикловой зарядке литий-ионных аккумуляторных батарей. Развитие электромобилей, в отличие от газомоторных, основывается на таких прорывных технологиях, как выработка и

накопление энергии, возобновляемые источники энергии, наноматериалы, интеллектуальные сети. Эти наукоемкие технологии подталкивают к развитию таких областей знаний, как материаловедение, автономные транспортные средства, IT-технологии, анализ больших данных, имитационное моделирование, искусственный интеллект. Что касается экологичности в эксплуатации, электромобилям альтернативы нет. Обладая более высоким кпд, они становятся локомотивом внедрения в мире энергоэффективных технологий. Правда, есть эксперты, которые считают, что переход на электротягу может нанести еще больший вред экологии, чем автомобили на нефтяном топливе. Они утверждают, что увеличение количества электрокаров приведет к повышению нагрузки на тепловые электростанции (ТЭС), что, в свою очередь, вызовет увеличение объема выбросов вредных веществ в атмосферу, включая сажу, углекислый газ и серные соединения. С помощью тепловых электростанций сейчас производится около 90 % всей мировой электроэнергии. В структуре мощностей российской энергетики на долю ТЭС приходится 67,9 %, а доля "зеленых" генерирующих мощностей — гидроэлектростанций 20,2 %, атомных — 11,6 % (рис. 5). Доля возобновляемых источников энергии не превышает 0,28 % от общей выработки электроэнергии.

В качестве топлива в ТЭС в основном используется уголь и газ. Так, в 2015 г. из выработанной 24 255 ТВт·ч электроэнергии в мире 39 % генерировалось сжиганием угля, 23 % — газа, и лишь менее 34 % за счет экологически чистых источников. В некоторых странах установилась сильная зависимость ТЭС от одного вида топлива. Так, в Китае 62 %, в Индии 58 % электроэнергии вырабатывается на угольных ТЭС, в Бразилии 65 %, в Канаде 56 % — на гидроэлектростанциях, во Франции — 48 % на атомных электростанциях. В европейской части России большинство ТЭС переведены на газ. Уголь сжигается преимущественно на станциях, расположенных в Сибири и Дальнем Востоке. Многие тепловые электростанции в России используют несколько видов топлива.

Вредные выбросы ТЭС могут быть существенно сокращены за счет увеличения доли газа в выработке электроэнергии и повышения эффективности сжигания топлива. В странах ЕС 21 % электроэнергии получают за счет сжигания газа, а в России — 51 %. У современных ТЭС, вырабатывающих только электроэнергию, коэффициент полезного действия (кпд) составляет 38...40 %, а у теплоэлектроцентралей, снабжающих потребителей еще и горячей водой, он доходит до 85 %. Кстати, у газовых двигателей внутреннего сгорания кпд не превышает 35 %. ТЭС, как правило, расположены за пределами населенных пунктов, т. е. вредные выбросы они осуществляют локально. Львиная же доля выбросов газомоторного транспорта будет сосредоточена в городах. Можно утверждать, что проблема загрязнения атмосферы транспортом будет кардинально решаться генерацией электричества за счет возобновляемых источников энергии и "зеленых" электромобилей.

В мире в последние 10 лет происходит интенсивное наращивание мощностей по генерированию электроэнергии за счет возобновляемых источников. Страны, ориентированные на будущее, сейчас массово внедряют в энергетике "зеленые" технологии. Так, в 2017 г. генерация электроэнергии за счет возобновляемых источников росла в три раза быстрее, чем конечное потребление энергии. В итоге, солнечная, ветровая и биоэнергетика совместно выработали впервые больше электричества, чем угольные электростанции ЕС (см. рис. 5). С учетом гидроэнергетики в странах ЕС более 43 % энергии генерируется за счет возобновляемых источников. В 2017 г. 25 % энергопотребления в мире было удовлетворено за счет возобновляемых источников, в Китае — 1/4, в США, Индии и Японии — 1/6. В Норвегии уже

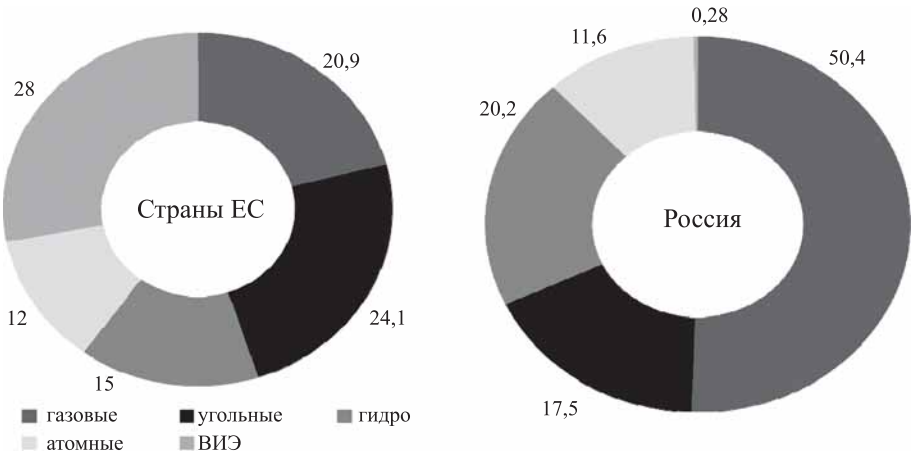

Рис. 5. Структура электроэнергетики в 2017 г. по установленной мощности, %. Составлено по данным [7]

сейчас 98 % электричества производят из возобновляемых источников энергии [9]. Один из лидеров в области использования экологически чистой энергии — Дания в 2018 г. 43 % своих потребностей в электроэнергии покрыла за счет энергии из ветра. Датчане на этом не останавливаются: к 2030 году более 50 % электроэнергии должны производить станции на возобновляемых источниках, а к 2050 г. — все 100 %.

По экспертной оценке в 2025 г. 50 % энергии будет выработано за счет "зеленых" источников. По данным Имперского колледжа Лондона, к 2050 г. солнечная энергия будет удовлетворять 29 % мирового производства электроэнергии. По данным Международного агентства по возобновляемым источникам энергии, благодаря удешевлению "зеленой" энергетики и роста цен на нефть в 2023 г. 30 %, а в 2030 г. 55 % генерируемой электроэнергии в мире будет приходиться на экологически чистую энергетику. К тому времени треть всего транспорта на планете будет представлена электромобилями и как результат — спрос на нефть упадет на 25 млн баррелей в сутки. Развитие "зеленой" энергетики и является акселератором мировой тенденции электрификации транспортных средств [8].

Исследователи Свободного университета Брюсселя провели анализ воздействия электромобилей в течение их жизненного цикла на климат. Ими было установлено, что в условиях структуры производства электроэнергии в странах ЕС в 2015 г., выбросы углекислого газа (CO_2) в течение жизненного цикла электромобиля на 45 % ниже, чем у аналогичного дизельного автомобиля (рис. 6) [8]. С увеличением доли возобновляемых источников энергии в структуре электроэнергетики негативное воздействие электрического транспорта за жизненный цикл будет уменьшаться.

Интересный эксперимент был проведен учеными Австралии, в ходе которого было выявлено: какая силовая установка окажется более экологичной — электрическая или дизельная. Зарядить аккумулятор электрокара Tesla Model S P85D они решили с помощью дизельного генератора. В роли объекта сравнения взяли универсал Volvo V40 с дизельным двигателем D4 рабочим объемом в 2 л. Сравниваемые автомобили проехали по тестовому маршруту с одинаковой скоростью 105 км. Испытания показали, что дизельный автомобиль израсходовал на этот путь 4,8 л топлива, а электромобиль, в пересчете на дизельное топливо, потраченное на работу генератора, — 4,46 л, т. е. на 7,6 % меньше. При этом снаряженная масса

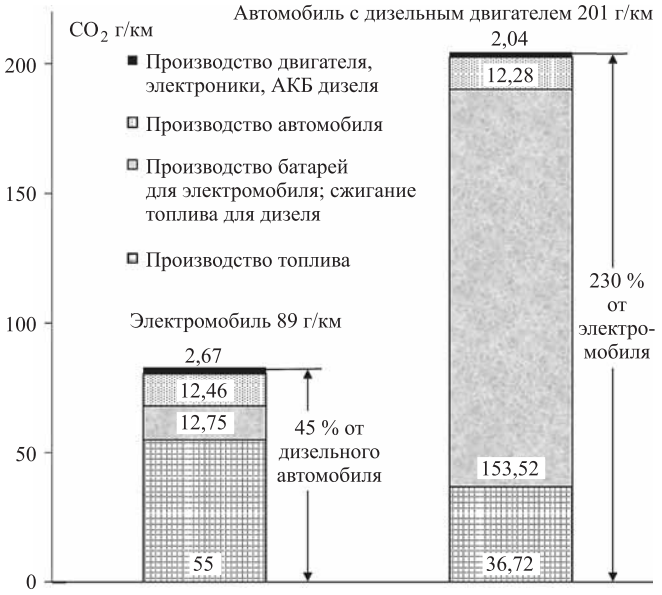

Рис. 6. Удельные выбросы CO_2 за жизненный цикл электромобиля массой 1200 кг и автомобиля с дизельным двигателем [8]

Volvo V40 составила 1,5 т, а Tesla Model S P85D — 2,2 т. Таким образом, если даже использовать для зарядки аккумуляторов дизельное топливо, то все равно электромобиль экономически выгоднее [16].

Надо учесть еще тот факт, что даже экспоненциальный рост количества электромобилей окажет лишь незначительное влияние на электроэнергетику. Эксперты Wood Mackenzie прогнозируют, что потребление электромобилями электроэнергии достигнет примерно 1 % объема выработки или 350 ТВт·ч/год лишь к 2035 г. А если заряжать электромобили за счет электроэнергии, получаемой из возобновляемых экологически чистых источников, то не это ли решение проблемы зависимости человечества от "черного золота"?

Нефтедобывающие страны серьезно озабочены возможным падением спроса на нефтепродукты, следовательно, цен на нефть вследствие вытеснения электромобилями автомобилей с бензиновым двигателем. Эксперты Bloomberg New Energy Finance (BNEF) оценивают, что к 2040 г. электромобили и электробусы будут замещать 8,5 млн баррелей нефти в день — это примерно в 3 раза больше, чем потребляет сейчас Германия. Прогнозы Института комплексных стратегических исследований еще оптимистичнее — 10 млн баррелей. При этом потребление электроэнергии возрастет на 5 %. Эффект замещения стал заметен уже сейчас: в 2017 г. дневная потребность в нефти снизилась на 380 тыс. баррелей. При этом

потребление газа будет расти на 0,8...1,12 трлн м^3, который понадобится как для выработки новых электромощностей, так и альтернативного газомоторного топлива [10].

Еще один существенный момент — с электромобилизацией у населения появляется заинтересованность в выработке электроэнергии для зарядки своих автомобилей. Генерация энергии традиционно являлась "глубоко" монополизированной отраслью. Электромобили могут подтолкнуть их собственников, живущих в индивидуальных домах, к развитию локальной "зеленой" энергетики. В стране вполне реально повторить "план ГОЭЛРО", положивший в свое время начало индустриализации СССР. На этот раз план развития "малой энергетики" с электромобилизацией могут дать толчок новой индустриализации России.

Экономический эффект электромобиля

Мнение, что "электромобили всегда будут дороже, чем машины с ДВС", скорее всего миф, чем реальность. Все познается в сравнении. Расчеты экспертов бизнес-школы "Сколково" показывают, что стоимость за три года владения Tesla Model S уже в 2013 г. стала ниже, чем у бензинового Mercedes S — $120 и $110 тыс. соответственно [11]. Отчет Союза обеспокоенных ученых [12] показал, что переход на электромобиль экономит среднему американцу $770 в год. Исследователи изучили 50 крупнейших городов США и обнаружили, что экономия на топливе колеблется от $443 до $1077 в год, в зависимости от соотношения цен на бензин и электричество в регионе.

Для примера сравним по топливной экономичности два хэтчбека Nissan — самый продаваемый в России электромобиль Leaf (цена €23 тыс.) и бензиновую Tiida (€18 тыс.). В смешанном цикле движения электромобиль Leaf расходует в среднем 15 кВт·ч/100 км. У Tiida расход бензина составляет 6,4 л/100 км. При тарифе на электроэнергию 4,5 руб/кВт·ч стоимость 1 км пробега Leaf составляет 0,68 руб. Пробег 1 км для Tiida при цене бензина АИ-95 45 руб/л обходится в 2,87 руб., т. е. в 4,22 раза дороже. Достаточна ли данная экономия для возврата переплаты при покупке электромобиля? Разница в цене в 5 тыс. евро при курсе 75 руб/евро, за счет экономии топлива, может быть "скомпенсировано" при пробеге 171 тыс. км, т. е. при годовом пробеге 30 тыс. км потребуется менее 6 лет. Расчеты показывают, что владелец от покупки электромобиля экономической выгоды практически не имеет. Правда, при расчетах не был учтен тот факт, что техническое обслуживание электромобиля дешевле бензинового, так как у него нет двигателя, а трансмиссия существенно проще. Электромобилю не нужно периодически менять масло, фильтры. Кроме того, рекуперация при торможениях позволяет экономить до 20 % энергии аккумуляторов, свести к минимуму износ тормозных колодок.

Экономическая эффективность электромобилей подтверждаются и результатами исследователей университета Лидса, которые собрали данные за 4 года по совокупной стоимости владения автомобилями четырех типов: с гибридной силовой установкой, с бензиновым двигателем, подключаемых гибридов и электромобилей [13]. В стоимости владения учитывались следующие факторы: цена покупки, стоимость бензина (электроэнергии), страхование; налоги; техобслуживание. Оказалось, что "чистые" электромобили, несмотря на более высокую цену, выходят самыми дешевыми на рынках Великобритании и Калифорнии, несколько дороже на рынках Японии и в Техасе (табл. 2). Основная причина — экономия на топливе. У электромобилей также ниже стоимость техобслуживания —

Таблица 2

Совокупная стоимость владения автомобилем за 4 года, фунт стерлингов

Регион	Тип силовой установки автомобиля			
	бензиновый двигатель	гибридный	гибридный подключаемый	"чисто" электрический
Япония	9054	10 106	10 752	10 407
Калифорния	7516	8497	8654	7087
Техас	7115	7366	7915	9122
Великобритания	12 285	12 915	15 185	10 787

в среднем на 15 %, поскольку у них конструкция проще, ремонт обходится дешевле. Еще одна причина меньшей стоимости обслуживания электромобилей — меньшая нагрузка на тормозную систему, поскольку электромобили в основном тормозят электродвигателем, а не тормозными колодками. Кроме того, при торможении происходит рекуперация энергии, что позволяет экономить до 20 % зарядки аккумуляторов.

Нужно отметить, что без учета государственных субсидий стоимость владения автомобилей с бензиновым двигателем все-таки ниже, чем у электромобилей. Субсидия государства при покупке электромобиля в Великобритании и Японии составляет около $6700, а в США — $8700. На этапе популяризации "зеленого" транспорта поддержка государства необходима. Задача государства — создать инфраструктуру и стимулировать массовое производство экологичного транспорта. После развертывания инфраструктуры и начала массового производства дешевых электромобилей можно прекратить господдержку, потому что электромобили станут дешевле по стоимости владения бензиновых автомобилей и без субсидий.

Как предрекают эксперты, если нормы на выбросы вредных веществ продолжат ужесточаться, то к 2020 г. автомобили с бензиновыми и дизельными двигателями по цене "догонят" электромобили. В то же время, за счет снижения цен на самый дорогой компонент электромобиля — аккумулятор, будет снижаться цена и электромобиля. Tesla в 2018 г. освоила выпуск Model 3, цена которой в базовой комплектации стоит $35 тыс., что уже сравнимо с бензиновыми аналогами. В качестве опций предлагается доплатить: $5000 за улучшенный автопилот, $3000 за возможность полного самоуправления.

Применение разного рода субсидий, льгот существенно могут повысить привлекательность электромобилей. Например, во Франции, если сдать автомобиль с дизельным двигателем старше 14 лет и купить электромобиль, то можно получить скидку 10 тыс. евро. В Китае при покупке Nissan Leaf можно получить субсидию до $7700, и тогда он будет незначительно дороже бензинового аналога. При больших пробегах, дорогом бензине и дешевой электроэнергии электромобили уже сегодня вполне достойно конкурируют с бензиновыми аналогами.

Грузовик на электротяге эффективнее дизельного. Данное утверждение подтверждается и расчетами автора [14], которые показывают, что применение электротяги дает значительную выгоду на коммерческом транспорте, так как расход топлива и пробеги у грузовиков существенно больше, чем у легковых автомобилей. Была произведена сравнительная оценка экономической эффективности за жизненный цикл электротягача Tesla Semi с полуприцепом и аналогичного дизельного тягача DAF XF105 по критерию совокупная стоимость владения. Годовой пробег автопоездов был принят 160 тыс. км, срок эксплуатации 10 лет. Для обеспечения сопоставимости расчетов полная масса автопоездов была принята одинаковой — 36,28 т. После 1 млн км пробега предусматривался капитальный ремонт тягачей. Затраты на капитальный ремонт дизельного автопоезда принимались в размере 50 % стоимости тягача, а электротягача — 50 % затрат на капремонт дизельного тягача, так как его самые дорогие компоненты — аккумулятор, электромоторы, инверторы не подвергаются капитальному ремонту, служат до списания грузовика.

Расчеты по методике, описанной в работе [15], показали, что совокупная стоимость владения за 10 лет электрогрузовика на 5377 тыс. руб. меньше, чем у дизельного тягача. При этом суммарные эксплуатационные расходы за 10 лет эксплуатации дизельного тягача составили 44 387 тыс. руб., а у Tesla Semi — 30 588 тыс. руб., т. е. на 13 799 тыс. руб. меньше. Удельные эксплуатационные затраты электрического тягача на 1 км пробега меньше на 45 %. Данная экономия получена, прежде всего, благодаря тому, что электрогрузовик на 1 км пробега расходует электроэнергию на 5,7 руб., тогда как дизельный автопоезд на 11,70 руб., т. е. в 2 раза больше. Затраты на топливо у дизельного тягача за 10 лет на 9600 тыс. руб. больше, чем у Tesla Semi на электроэнергию. Кроме того, затраты на техническое обслуживание, текущий и капитальный ремонт электрогрузовика за 10 лет на 3569 тыс. руб. меньше, чем у конкурента [10].

С учетом того, что Tesla Semi дороже дизельного автопоезда на 8422 тыс. руб. получается, что экономическая выгода от эксплуатации электрокара в 1,6 раза больше, чем переплата при покупке. Ежегодно получаемая выгода от эксплуатации электрогрузовика составила в среднем 1380 тыс. руб., что позволяет компенсировать "переплату" при покупке за 6 лет эксплуатации.

Таким образом, можно утверждать, что будущее за электротранспортом. По мере развития возобновляемой энергетики привлекательность электротранспорта будет возрастать. Газ, хотя и является альтернативой электричеству, кардинально не решает экологическую проблему на

транспорте, может явиться лишь промежуточным этапом в эволюции транспортных средств. Газовые двигатели не обеспечивают "нулевые выбросы". Их кпд конструктивно достиг своего предела, ждать от них энергоэффективного "зеленого" будущего не приходится. Прогресс в выработке электроэнергии за счет возобновляемых источников и накопителей энергии однозначно определил курс развития транспорта — массовый переход на электрическую тягу. Имеющейся жидкотопливной заправочно-сервисной инфраструктуре нецелесообразно вдобавок создавать еще одну — газомоторную. Курс на массовую газификацию транспорта стратегически бесперспективен, так как страна не получает нового качества развития, остается потребителем технологических решений вчерашнего дня. Газомоторный транспорт может быть использован в регионах с суровыми климатическими условиями, где значительная энергия аккумуляторов будет расходоваться на обогрев салона. Но в таких регионах из-за слабого развития транспорта экологическая проблема стоит не так остро. Кроме того, газовая инфраструктура малонаселенных территорий не будет окупаться.

Газ целесообразно сжигать на локально сосредоточенных высокоэффективных теплоэлектроцентралях, чем в двигателях миллионов автомобилей с кпд менее 35 %. Стратегический курс на газ на транспорте может оставить Россию на "обочине" промышленно-технической революции первой половины XXI века — электромобилизации. Имеющиеся ресурсы должны быть направлены на организацию производства электромобилей, их компонентов, развитие инфраструктуры, генерацию энергии за счет возобновляемых источников. По аналогии с другими инновационными технологиями, по мере совершенствования конструкций, технологий производства и обслуживания в эксплуатации, переход на электрические транспортные средства будет постепенно нарастать, пока не приобретет лавинообразный характер. Электромобили, несмотря на их относительную дороговизну, недостаточную развитость инфраструктуры, по экономичности уже догнали автомобили, оснащенные двигателями внутреннего сгорания. Кроме того, электромобили являются ступенью в переходе на беспилотные транспортные средства, которые внесут коренные изменения в жизнь человеческого общества. Электромобиль ввиду своего высокой технологичности, экологичности способствует сдвигу всей экономики в сторону энергоэффективных решений, что должно быть принято во внимание при выборе стратегии развития транспорта будущего.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Овсянников Е. М., Фомин А. П.** Тяговые электрические системы автотранспортных средств. — М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2019. — 303 с.
2. **Будрейко Е. Н.** Экология городов. Загрязнение почв, воды и воздуха. URL: https://www.portal-slovo.ru/impressionism/41495.php (дата обращения 20.03.2019 г.)
3. **Проблемы** экологии и загрязнение атмосферного воздуха выхлопами газа автомобильного транспорта. URL: https://vuzlit.ru/1340135/problemy_ekologii_zagryaznenie_atmosfernogo_vozduha_vyhlopami_gaza_avtomobilnogo_transporta (дата обращения 14.03.2019 г.).
4. **Россия** застряла между Африкой и Европой. URL: https://www.gazeta.ru/auto/2014/02/21_a_5920689.shtml (дата обращения 21.03.2019 г.).
5. **Европейское соглашение,** касающееся работы экипажей транспортных средств, производящих международные автомобильные перевозки (ЕСТР) (Женева, 1 июля 1970 г.). URL: http://base.garant.ru/2560634/#block_6#ixzz4zLJykWeI. (дата обращения 15.11.2018 г.).
6. **Подведены итоги** конференции "Газомоторное топливо: инфраструктура 2018". URL: https://mplast.by/novosti/2018-06-06-itogi-gazomotornoe-toplivo-infrastruktura-2018/ (дата обращения 21.03.2019 г.).
7. **Структура** электрогенерации в крупнейших странах мира в 2017 году. URL: http://peretok.ru/infographics/699/18194/ (дата обращения 02.12.2018 г.).
8. **Сидорович В.** Миф о "грязном" электромобиле-2. URL: http://renen.ru/the-myth-of-the-dirty-electric-car-2. (дата обращения 4.12.2018 г.).
9. **Общее количество** электромобилей в мире превысило отметку 2 млн экземпляров. URL: https://itc.ua/blogs/obshhee-kolichestvo-elektromobiley-v-mire-prevyisilo-otmetku-2-mln-ekzemplyarov-iz-kotoryih-1-2-mln-chistyih-elektromobiley-i-0-8-mln-podklyuchaemyih-gibridov. (дата обращения 10.11.2018 г.).
10. **Удар по России:** как электромобили давят рынок нефти. URL: https://www.gazeta.ru/business/2017/10/20/10951334.shtml. (дата обращения 26.03.2019 г.).
11. **Сколько** сейчас эксплуатируется электромобилей в мире. [Эл. ресурс]. URL: http://beelead.com/skolko-elektromobilej-mire (дата обращения 25.06.2018 г.).
12. **Гогладзе О.** По прогнозам шведской компании EV-Volumes, к концу 2018 года на дорогах мира будет уже 5 млн электрических автомобилей. URL: https://hightech.fm/2017/12/26/lectric-and-plug-in-hybrid (дата обращения 10.11.2018 г.).
13. **Электромобили** в западных странах уже обходятся дешевле ДВС. URL: https://habr.com/post/374061 (дата обращения 21.11.2018 г.).
14. **Фасхиев Х. А.** Совокупная стоимость владения электромобилем // Справочник. Инженерный журнал. 2018. № 8. С. 41—49; № 9. С. 47—54.
15. **Костин И. М., Фасхиев Х. А.** Технико-экономическая оценка грузовых автомобилей при разработке. — Набережные Челны: Изд-во Камского политехнического института, 2002. — 479 с.
16. **Зарядка Tesla** дизель-генератором оказалась экологичнее езды на дизельной машине. URL: https://nplus1.ru/news/2018/02/19/tesla (дата обращения 26.03.2019 г.).

УДК 629.113

В. Н. Козловский, д-р техн. наук, СамГТУ, г. Самара, **М. А. Пьянов,** канд. техн. наук, ПАО "АВТОВАЗ", г. Тольятти, **С. И. Клейменов,** ООО "Бизнес-Консалт", г. Тольятти, **А. В. Заятров,** канд. техн. наук, ТГУ, г. Тольятти
E-mail: kozlovskiy-76@mail.ru

АКТУАЛИЗАЦИЯ ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ И РЕАЛИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО КОМПЛЕКСА ДИАГНОСТИКИ НЕИСПРАВНОСТЕЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

В статье представлены результаты комплексного теоретического исследования, возможности оценки работоспособности компонентов системы электрооборудования автомобилей в режимах переходных процессов.

Ключевые слова: *автомобилестроение, автомобиль, диагностика, система электрооборудования.*

The article presents the results of a comprehensive theoretical study of the possibility of assessing the performance of components of the electrical equipment system of cars in the modes of transients.

Keywords: *automotive, automobile, diagnostics, electrical system.*

Переходный процесс в электрической цепи возникает в том случае, если появляются причины, стремящиеся изменить величину запаса электрической энергии в этой цепи. Электрическая энергия может быть запасена в форме магнитного или электрического поля; таким образом, лишь при наличии в электрической системе реактивности (индуктивности, емкости или той и другой вместе) возможен переходной процесс. Сущность этого процесса состоит в том, что новое энергетическое состояние системы, вызываемое причинами, изменяющими запас энергии, не может возникнуть сразу, т. е. одновременно с возникновением этих причин, а значит, не может следовать во времени закону их изменения. Поэтому закон изменения электрического состояния системы отличается от закона изменения причины, вызвавшей этот процесс. Также он отличается и от закона, который описывает конечное состояние системы. Изменение запаса электрической энергии возможно осуществить как изменением приложенного к электрической цепи напряжения, так и путем изменения величины любого из параметров этой цепи (в том числе и активного сопротивления).

Таким образом, установившийся процесс в электрической цепи — процесс, происходящий в ней спустя такой промежуток времени после последнего изменения ее состояния (изменение величины приложенного напряжения или параметров цепи), что при принятой точности измерения можно пренебречь затухающей частью процесса. Запас энергии в цепи при установившемся процессе остается постоянным в любой момент времени.

С точки зрения характера нагрузки все электрооборудование автомобиля можно подразделить на четыре группы, представляющие собой: 1 — активную нагрузку (*R*-цепь); 2 — активно-индуктивную нагрузку (*RL*-цепь); 3 — активную нелинейную нагрузку — лампы накаливания (ЛН); 4 — электромеханические преобразователи (ЭМП).

Рассмотрим на примере автомобиля ВАЗ-1118 LADA KALINA — распределение типов нагрузки среди изделий электрооборудования. В таблице систематизированы изделия электрооборудования ВАЗ-1118 с классификацией типа нагрузки [1].

Широко распространенными методами для анализа и расчета переходных процессов являются: метод, называемый в литературе классический; операторный метод (основанный на преобразовании Лапласа); метод расчета с помощью интеграла Дюамеля.

Классификация изделий электрооборудования автомобиля LADA KALINA

№ п/п	Наименование изделия электрооборудования	Тип нагрузки
1	Лампа габаритных огней	3
2	Лампа ближнего света	3
3	Лампа дальнего света	3
4	Лампа указателя поворота	3
5	Контроллеры	1
6	Лампа фонаря освещения номерного знака	3
7	Форсунка	2
8	Модуль зажигания	2
9	Электропривод вентилятора системы охлаждения	4
10	Электродвигатель бензонасоса	4
11	Обогрев заднего стекла	1
12	Обогрев зеркал заднего вида	1
13	Электровентилятор системы отопления салона	4
14	Лампа фонаря заднего хода	3
15	Лампа плафона салона	3
16	Лампа сигнала торможения	3
17	Обогрев сидений	1
18	Электропривод стеклоочистителя	4
19	Электродвигатель омывателя ветрового стекла	4
20	Звуковой сигнал	2
21	Реле включения стартера	2
22	Стартер	4

В представленной работе в основном рассматриваются изделия электрооборудования автомобилей, имеющие активно-индуктивную нагрузку, как наиболее наглядно характеризующие предлагаемый метод диагностирования. Для анализа переходных процессов в электрических цепях этих изделий автомобильного электрооборудования будем использовать операторный метод.

Активная нагрузка

При отсутствии реактивной составляющей нагрузки переходный процесс в электрических цепях электрооборудования невозможен. Таким образом, использование параметров переходного процесса при коммутации для диагностирования работоспособности потребителей, имеющих только активную нагрузку, также невозможно, поскольку ток потребления определяется только режимом работы этих устройств и не зависит от внешних воздействий.

Активно-индуктивная нагрузка. Поскольку в начальный момент времени (при разомкнутой цепи) ток в электрической цепи отсутствует, т. е. энергия магнитного поля $L\frac{I_L^2}{2}=0$, применим для анализа переходного процесса преобразование Лапласа.

На рис. 1 представлены схема замещения изделия электрооборудования с активно-индуктивной нагрузкой (*а*) и осциллограмма переходного процесса (*б*).

Дифференциальное уравнение цепи по второму закону Кирхгофа имеет вид:

$$R_i(t)+L\frac{di(t)}{dt}=u(t),$$

где $R=R_{вн}+R_н$ (рис. 1), $R_{вн}$ — внутреннее сопротивление аккумуляторной батареи; $R_н$ — сопротивление нагрузки в установившемся режиме; $u(t)=E$ — эдс аккумуляторной батареи.

Применяя преобразование Лапласа к обеим сторонам уравнения, получим:

$$RI(p)+pL_i(p)-L_i(0)=U(p).$$

Из этого равенства, как из обыкновенного алгебраического уравнения, находим изображение неизвестного тока:

$$I(p)=\frac{U(p)+L_i(0)}{R+pL},$$

в частности, при $i(0)=0$ имеем:

$$I(p)=\frac{U(p)}{R+pL}. \quad (1)$$

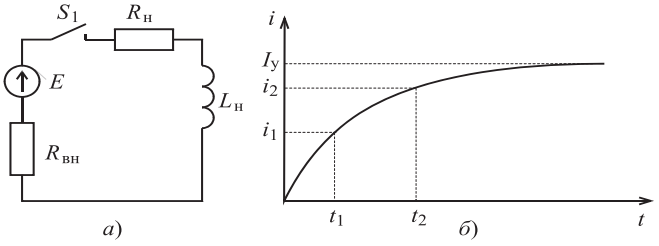

Рис. 1. Схема замещения изделия электрооборудования с активно-индуктивной нагрузкой (*а*); осциллограмма переходного процесса (*б*)

Поскольку изделие электрооборудования подключается к источнику постоянного напряжения, то, используя преобразованную по Лапласу функцию постоянного напряжения,

$$L\left[U_O 1(t)\right] = \frac{U_O}{p},$$

получаем следующее выражение для искомого тока:

$$I(p) = \frac{E}{p}\frac{1}{R + pL}. \qquad (2)$$

Так как p — действительное или комплексное число, то выражение (2) можно записать в форме:

$$I(p) = \frac{E}{R}\left(\frac{1}{p} - \frac{1}{p + \frac{R}{L}}\right).$$

Найдем оригинал $i(t)$ по его изображению (1).

Используя таблицу стандартных функций преобразования Лапласа, искомое решение принимает вид:

$$i(t) = \frac{E}{R}\left[1 - e^{-\left(\frac{R}{L}\right)t}\right].$$

Таким образом, для изделий электрооборудования, имеющих активно-индуктивную нагрузку (модуль зажигания, форсунки и др.), характерно относительно медленное (от единиц до десятков миллисекунд) нарастание тока при включении (рис. 1, *б*).

Поскольку для изделий электрооборудования, $R_{вн} << R_н$, можно записать уравнение тока:

$$i(t) = \frac{E}{R_н}\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right), \qquad (3)$$

где $\tau = \frac{L_н}{R_н}$ — постоянная времени тока переходного процесса; $R_н$ — сопротивление нагрузки в установившемся режиме; $L_н$ — индуктивность нагрузки.

Аналитическая зависимость длительности переходного процесса от наличия короткозамкнутых витков в катушке индуктивности представлена на рис. 2.

Современный уровень средств измерений обеспечивает частотный диапазон измерений тока с частотой до 10 кГц, что позволяет производить высокоточные измерения тока переходного процесса с целью определения значения постоянной времени τ и дальнейшего использования этого значения в качестве диагностического параметра

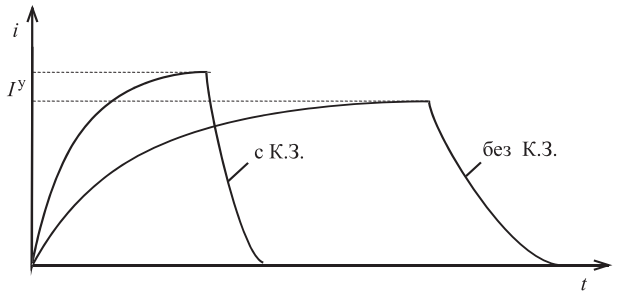

Рис. 2. Зависимость длительности переходного процесса от наличия короткозамкнутого витка

при определении работоспособности изделий автомобильного электрооборудования.

Таким образом, использование параметров переходного процесса для диагностирования работоспособности изделий, имеющих активно-индуктивную нагрузку, не только возможно, но и целесообразно, поскольку уменьшает время диагностирования в несколько раз вследствие отсутствия необходимости дожидаться установившегося процесса.

Лампы накаливания. Лампы накаливания характеризуются броском тока при включении, связанным с низким сопротивлением спирали в холодном состоянии. На рис. 3 представлена типичная осциллограмма включения ламп дальнего света. При нагреве спирали ток снижается и выходит на номинальный. Отношение величины тока включения к номинальному току может достигать 6-кратного превышения. Характерное время броска тока, в зависимости от мощности

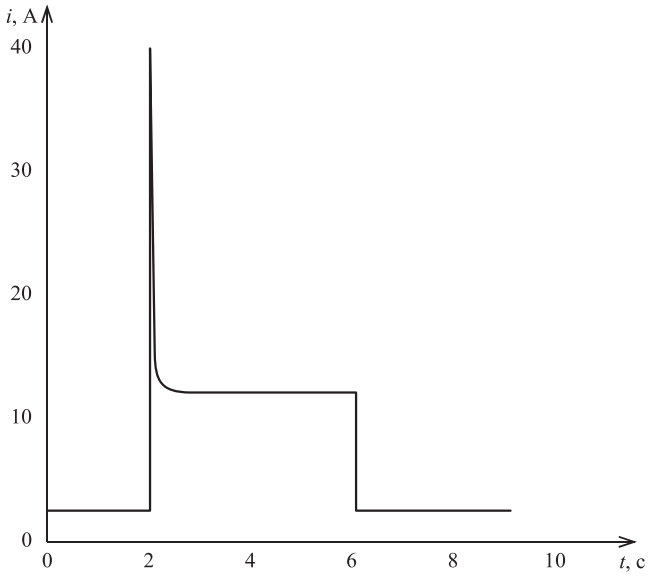

Рис. 3. Осциллограмма включения ламп дальнего света

лампы, может измеряться от миллисекунд до десятков и даже сотен миллисекунд.

В данном случае постоянная времени, определенная из осциллограммы тока, дает представление о тепловой инерционности лампы, а производная переходного тока, измеренная в момент включения лампы, обратно пропорциональна теплоемкости нити лампы. Эти величины могут быть использованы в качестве критериев для диагностирования или для сравнения качества ламп от разных производителей.

Электромеханические преобразователи

Все используемые в электрооборудовании автомобиля на сегодняшний момент электродвигатели относятся к классу коллекторных электродвигателей постоянного тока с постоянными магнитами. Коллекторные двигатели характеризуются максимальным током в заторможенном состоянии, определяемом величиной активного сопротивления обмоток и током холостого хода в отсутствии нагрузки на валу. В момент пуска двигателя происходит бросок тока, величина которого может достигать тока заторможенного состояния и затем спадает по экспоненте к установившемуся значению тока нагрузки в течение времени релаксации. Длительность броска тока составляет от десятков до сотен миллисекунд. При быстром уменьшении нагрузки электродвигатель начинает отдавать ток обратно в сеть в течение времени релаксации. Форма потребляемого электродвигателем тока в установившемся режиме представляет собой пилообразные импульсы на пьедестале. Амплитуда пилообразных импульсов увеличивается при увеличении тока нагрузки. Частота пилообразных импульсов сильно зависит от величины приложенного напряжения и механического сопротивления нагрузки. Частота пилообразных импульсов тока определяется скоростью вращения вала электродвигателя и числом пар ламелей коллектора.

В настоящей работе не будем рассматривать электрические процессы, происходящие в электромеханических преобразователях.

Метод диагностирования электрооборудования автомобиля. В основе предлагаемого метода диагностирования автомобильного электрооборудования лежит высокоточное измерение потребляемого тока устройств электрооборудования при коммутации, дальнейшая обработка результатов измерений с целью получения значения постоянной времени тока переходного процесса, позволяющего определить комплектующие, вышедшие из строя. Кроме того, этот метод позволяет определить комплектующие, имеющие отклонения технических характеристик от заявленных производителем, и, как правило, приводящие к выходу из строя автомобиля в процессе эксплуатации.

Рассмотрим подробнее предлагаемый метод диагностирования.

Измеряя значения тока через некоторый промежуток времени (см. рис. 1, *б*), получаем, согласно (3):

$$\begin{cases} i(t_1) = \dfrac{E}{R_{\text{вн}} + R_{\text{н}}}\left(1 - e^{-\frac{t_1}{\tau}}\right); \\ i(t_2) = \dfrac{E}{R_{\text{вн}} + R_{\text{н}}}\left(1 - e^{-\frac{t_2}{\tau}}\right), \end{cases}$$

где $I_{\text{уст}} = \dfrac{E}{R_{\text{вн}} + R_{\text{н}}}$ — установившееся значение тока в электрической цепи.

$$\begin{cases} i(t_1) = I_{\text{уст}}\left(1 - e^{-\frac{t_1}{\tau}}\right); \\ i(t_2) = I_{\text{уст}}\left(1 - e^{-\frac{t_2}{\tau}}\right). \end{cases}$$

Исходя из начальных условий коммутации $i(t = 0) = 0$, $i(t \neq 0) \neq 0$ и $t_2 > t_1$ следует, что $i(t_2) \neq 0$, $I_{\text{уст}}\left(1 - e^{-\frac{t_2}{\tau}}\right) \neq 0$. В рассматриваемом случае решением этой системы будет следующая зависимость:

$$\frac{i(t_1)}{i(t_2)} = \frac{1 - e^{-\frac{t_1}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{t_2}{\tau}}}. \qquad (4)$$

Выполняя замену переменных $\left| \begin{array}{l} \dfrac{i(t_1)}{i(t_2)} = k \\ e^{-\frac{1}{\tau}} = Z \end{array} \right|$, получаем уравнение:

$$k = \frac{1 - Z^{t_1}}{1 - Z^{t_2}}; \ (k - 1) + Z^{t_1} - kZ^{t_2} = 0.$$

Так как в рассматриваемом случае t_1 близко к t_2, а следовательно, $i(t_1)$ близко к $i(t_2)$, то $k - 1$ стремится к нулю. Получаем вырожденное уравнение:

$$Z^{t_1} - kZ^{t_2} = 0. \qquad (5)$$

Поскольку $t_2 = t_1 + \Delta t$, уравнение (5) принимает вид:

$$Z^{t_1} - kZ^{t_1+\Delta t} = 0.$$

Вынося общий множитель за скобку, получаем:

$$Z^{t_1}\left(1 - Z^{\Delta t}\right) = 0.$$

Данное уравнение имеет два решения:

$$\left[\begin{array}{l} Z^{t_1} = 0 \\ 1 - kZ^{\Delta t} = 0 \end{array}\right.; \left[\begin{array}{l} Z = 0 \\ Z^{\Delta t} = \dfrac{1}{k} \end{array}\right.; \left[\begin{array}{l} Z = 0 \\ Z = \sqrt[\Delta t]{\dfrac{1}{k}} \end{array}\right..$$

Возвращаясь к исходным переменным, получаем:

$$\left[\begin{array}{l} e^{-\frac{1}{\tau}} = 0 \\ e^{-\frac{1}{\tau}} = \sqrt[\Delta t]{\dfrac{i(t_2)}{i(t_1)}} \end{array}\right.;$$

$$\left[\begin{array}{l} \tau = \infty \\ \tau = (t_2 - t_1)\left(\ln\left(i(t_2)\right) - \ln\left(i(t_1)\right)\right)^{-1}. \end{array}\right.$$

Первый корень уравнения $\tau = \infty$ является вырожденным, следовательно, для расчета значения постоянной времени тока переходного процесса по замеренным мгновенным значениям тока следует использовать следующую зависимость:

$$\tau = (t_2 - t_1)\left(\ln\left(i(t_2)\right) - \ln\left(i(t_1)\right)\right)^{-1}. \qquad (6)$$

Таким образом, для рассматриваемого случая, где $R_{вн} << R_н$, постоянная времени τ зависит только от электрических параметров диагностируемого изделия и не зависит от таких параметров, как напряжение питания бортовой сети автомобиля и значения установившегося тока в электрической цепи изделия электрооборудования.

Следовательно, постоянная времени тока переходного процесса устройств электрооборудования при коммутации не зависит от режима работы электрической цепи, а ее величина однозначно характеризует состояние диагностируемого объекта.

Анализируя полученное на основании измерительной информации значение τ и сравнивая его с известным для эталонного изделия, можно делать вывод об исправности диагностируемого электрооборудования.

По изменению постоянной времени тока переходного процесса τ можно определить наличие в катушке индуктивности, например, короткозамкнутых витков, что нельзя сделать на основании анализа установившегося режима электрической цепи (на сопротивление нагрузки $R_н$ наличие короткозамкнутого витка практически не оказывает влияния, его изменение сопоставимо с погрешностью средства измерения, зато сильно влияет на $L_н$, поскольку образуется дополнительный магнитосвязанный контур).

Для оценки эффективности используются критерии эффективности согласно ГОСТ 20911—89:

— продолжительность диагностирования — интервал времени, необходимый для проведения диагностирования всего комплекса электрооборудования одного автомобиля;

— достоверность диагностирования — степень объективного соответствия результатов диагностирования действительному техническому состоянию изделия электрооборудования;

— полнота диагностирования — характеристика, определяющая возможность выявления неисправностей в изделии электрооборудования при выбранном методе его диагностирования.

Алгоритм диагностирования электрооборудования автомобиля. На основании предложенного нового метода разработаем новый алгоритм диагностирования, отличающийся от известных ранее тем, что в качестве дополнительного диагностического параметра (кроме тока потребления в установившемся режиме) для определения исправности электрооборудования будет использоваться полученное значение постоянной времени тока переходного процесса при коммутации электрической цепи, представлен на рис. 4.

Для синхронизации работы диагностического комплекса служит изменение первой производной тока по времени $\dfrac{di}{dt}$, точкой начала отсчета принимается момент времени, когда $\dfrac{di}{dt} \neq 0$. Четыре измерения мгновенного значения тока переходного процесса через минимальные промежутки времени, определяемые техническими возможностями измерительной системы, являются исходными данными для расчета по формуле (6) трех значений постоянной времени тока переходного процесса, среднее арифметическое которых принимается за измеренное. При необходимости окончание переходного процесса определяется также по значению первой производной тока по времени $\left(\dfrac{di}{dt} = 0\right)$.

В установившемся режиме измеряется ток потребления (определяется как среднее арифметическое трех замеров). Полученные значения

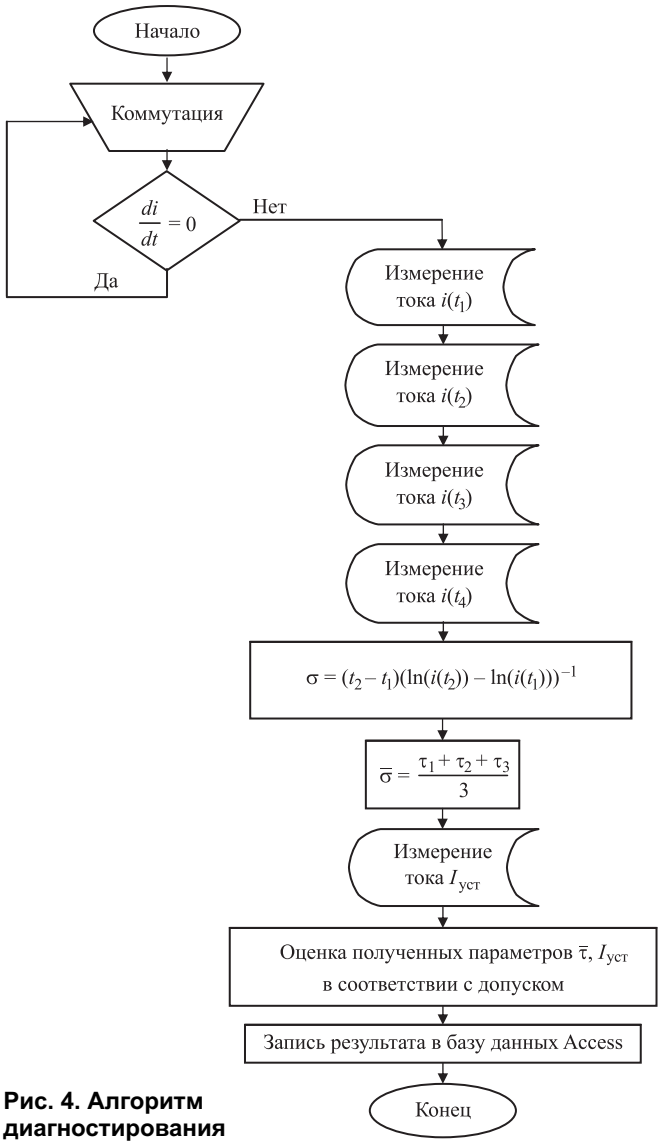

Рис. 4. Алгоритм диагностирования

постоянной времени тока переходного процесса при коммутации и тока потребления в установившемся режиме используются в качестве параметров для сравнения при определении исправности диагностируемого изделия электрооборудования. Причем отклонения этих технических характеристик более чем на 5 % от заявленных производителем, принимаются критерием для дефектовки изделия. Предлагаемое поле допуска диагностического параметра (±5 %), как и все существующие на настоящее время, определено экспериментально — статистическим методом.

Технические средства диагностирования

При выборе технических средств диагностирования, а именно первичного преобразователя измеряемого тока, следует руководствоваться такими показателями, как точность и технологичность измерения [2—5].

В технической диагностике наиболее распространены в настоящее время следующие первичные преобразователи тока: измерительный шунт; токовые клещи; датчик тока с неразрывным магнитопроводом.

Использование шунта в измерительной схеме позволяет с высокой точностью провести необходимые измерения на небольшом токовом диапазоне, ограниченном характеристикой шунта. Однако измерительный шунт включается в разрыв силовой цепи электрооборудования автомобиля, что значительно увеличивает время, отведенное на проведение диагностирования и привносит значительную погрешность в измерение переходными сопротивлениями в местах контакта измерительного модуля с электрической цепью автомобиля. К недостаткам этого преобразователя также можно отнести необходимость замены измерительного шунта при переключении на другой диапазон измерений, что ведет к усложнению управляющей схемы измерительного модуля, увеличению массогабаритных показателей измерительного устройства и общей трудоемкости проведения измерений.

Токовые клещи конструктивно представляют собой независимый модуль с разъемным магнитопроводом, позволяющим обхватывать токоведущий кабель без его разрыва или разъединения. В магнитопровод встроен чувствительный элемент Холла, преобразующий магнитный поток, наведенный в магнитопроводе протекающим по силовому кабелю током и прямопропорциональный ему, в ЭДС Холла. Встроенный в чувствительный элемент операционный усилитель усиливает наведенную ЭДС Холла. Таким образом, выходной сигнал полностью соответствует протекающему в силовом кабеле току.

Для регистрации значения производной тока переходного процесса в момент включения цепи удобно использовать пояс Роговского как "классический" инструмент бесконтактного измерительного преобразователя.

Выводы

Использование параметров переходного процесса при коммутации для диагностирования работоспособности потребителей, имеющих чисто активную нагрузку, невозможно, поскольку ток потребления определяется только режимом

работы этих устройств и не зависит от внешних воздействий.

1. Современный уровень средств измерений обеспечивает частотный диапазон измерений тока с частотой до 10 кГц, что позволяет производить высокоточные измерения тока переходного процесса с целью определения значения постоянной времени и дальнейшего использования этого значения в качестве диагностического параметра при определении работоспособности изделий автомобильного электрооборудования.

2. Использование параметров переходного процесса для диагностирования работоспособности изделий, имеющих активно-индуктивную и нелинейную активную нагрузку целесообразно, поскольку уменьшает время диагностирования.

3. Постоянная времени тока переходного процесса устройств электрооборудования при коммутации не зависит от режима электрической цепи, а ее величина однозначно характеризует состояние диагностируемого объекта.

4. В основе предлагаемого метода диагностирования автомобильного электрооборудования лежит высокоточное измерение мгновенных значений тока при коммутации, и обработка результатов измерений с целью получения значения постоянной времени тока переходного процесса, позволяющего определить комплектующие, имеющие отклонения технических характеристик от заявленных производителем.

5. Критериями для оценки эффективности применения разработанного согласно ГОСТ 20911—89 приняты продолжительность, достоверность и полнота диагностирования.

6. Новый алгоритм диагностирования отличается от известных ранее тем, что в качестве дополнительного диагностического параметра для определения исправности изделия автомобильного электрооборудования используется полученное значение постоянной времени тока переходного процесса при коммутации электрической цепи.

7. В качестве первичного преобразователя выбраны токовые клещи, работающие на эффекте Холла, как обладающие наилучшими показателями по технологичности измерения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Пьянов М. А., Козловский В. Н.** Обеспечение качества процесса диагностирования электрооборудования автомобилей: монография. — Самара: Издательство СамНЦ РАН. — 2014. — 150 с.
2. **Мороз С.** Автоматизация диагностической техники // Автомобильный транспорт. — 1990. — № 11. — С. 32—34.
3. **Анализ** измерительных систем. MSA / Пер. с англ. — Н. Новгород: АО "НИЦ КД", СМЦ "Приоритет", 1997.
4. **Измерения** в промышленности / Под ред. П. Профоса. Справочник, ч. I. — М.: Металлургия, 1990.
5. **Куликовский К. Л., Купер В. Я.** Методы и средства измерений: учеб. пособие для вузов. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 448 с. ил.

"КАМАЗ" поделился опытом работы

ООО "Центр обслуживания бизнеса" (ЦОБ), дочернее предприятие ПАО "КАМАЗ", с референс-визитом посетили руководители холдинга АО "Вертолеты России".

Делегацию, в состав которой вошли представители разных компаний холдинга, возглавила директор по экономике АО "Вертолеты России" Марина Ковалева. Цель визита — получить экспертное мнение по созданию и построению оптимальной работы центра обслуживания бизнеса для АО "Вертолеты России".

"За свою пятилетнюю историю ЦОБ заслужил авторитет в профессиональных кругах. Об этом свидетельствуют регулярные обращения с запросами по обмену опытом, референс-визиты, консультации на профессиональных конференциях", — отметила генеральный директор ООО "Центр обслуживания бизнеса" Лариса Зубрилова, презентовав работу камазовского специализированного подразделения. К слову, только экономический эффект за 2018 г. составил около 10 млн руб.

ЦОБ осуществляет учет, формирует бухгалтерскую, налоговую и управленческую отчетность. Сотрудники центра занимаются кадровым администрированием, поддерживают иные бизнес-процессы обслуживаемых предприятий. В своей работе ЦОБ держит курс на оптимизацию бизнес-процессов, в том числе благодаря внедрению программных роботов, которые помогают выполнять стандартные, повторяющиеся операции.

Пресс-служба ПАО "КАМАЗ"

УДК 621.436

А. Ф. Смык, д-р физ.-мат. наук, e-mail: afsmyk@mail.ru, **Л. В. Спиридонова,** канд. техн. наук, доцент, e-mail: lvspiridonova@yandex.ru, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)

ВКЛАД ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ИЗОБРЕТАТЕЛЕЙ В ЭВОЛЮЦИЮ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Рассмотрены основные вехи развития систем охлаждения двигателей внутреннего сгорания. Показан вклад российских инженеров Е. А. Яковлева и А. А. Саблукова в создание систем охлаждения.

Ключевые слова: *двигатель внутреннего сгорания, система охлаждения, Е. А. Яковлев, А. А. Саблуков.*

The main stages of the development of internal combustion engine cooling systems are considered. The contribution of the Russian engineers E. A. Yakovlev and A. A. Sablukov to the creation of the cooling systems is shown.

Keywords: *internal combustion engine, cooling system, E. A. Yakovlev, A. A. Sablukov.*

Введение

Двигатель внутреннего сгорания при работе выделяет тепло. Если его в избытке, возникает перегрев мотора, в недостатке — он работает не в полную силу. В связи с этим важную роль играет система охлаждения двигателя. Первая система охлаждения действовала по принципу чайника. Вода, окружавшая стенки и головку цилиндров, при нагревании испарялась, отнимала у мотора излишки тепла и исключала его перегрев — такую систему называли испарительной.

Систему охлаждения составляет совокупность устройств, обеспечивающих снижение температуры охлаждаемых деталей путем переноса теплоты и передачи ее в окружающую среду. На автомобиле перенос теплоты от двигателя осуществляется теплоносителями, в качестве которых используются жидкости и воздух [1]. Принудительное охлаждение на автомобиле появилось вместе с тепловым двигателем внутреннего сгорания. Первые двигатели обладали малой мощностью, автомобили способны были проезжать небольшие расстояния. Поэтому требования к охлаждению были не столь существенны.

Испарительные системы охлаждения

Первые системы охлаждения двигателя были испарительного типа (рис. 1, *а*) и представляли собой бак, заполненный водой, который двумя патрубками сообщался с жидкостным контуром двигателя, также содержащим воду. При работе двигателя температура воды в контуре повышалась и вследствие разности температуры воды в баке и контуре двигателя происходила циркуляция жидкости и ее перемешивание. Такой процесс называли термосифонной циркуляцией. Нагрев воды в баке вызывал ее испарение через отверстие в баке.

Уровень воды в баке при работе двигателя постоянно уменьшался, требовалось ее восполнение. Количество воды для дозаправки в бак во много раз превышало расход топлива, необходимого для работы двигателя. Подтверждением этому послужит следующий пример. Первое дальнее путешествие (протяженностью более 2500 км) на автомобиле "Benz-Victoria" в 1894 г. совершил барон Теодор фон Либиг из города Райхеибах в город Реймс и назад. На одном из участков маршрута протяженностью 1000 км было израсходовано 140 л бензина и 1500 л воды для охлаждения двигателя, т. е. расход охлаждающей воды превышал расход топлива в 11 раз.

В связи с этим в охлаждающих системах двигателя должен был предусматриваться резервный бак с водой, из которого периодически пополнялся рабочий бак охлаждающей системы. Система испарительного типа применялась и на первых тракторах, снабженных двигателями внутреннего сгорания [2]. В связи с таким огромным расходом

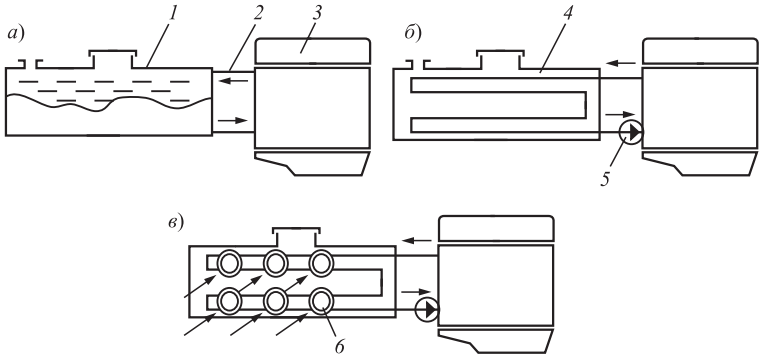

Рис. 1. Схемы первых систем охлаждения двигателей внутреннего сгорания:

а — испарительного типа; *б* — испарительного типа с замкнутым контуром, принудительная; *в* — с замкнутым контуром и потоком воздуха, принудительная; *1* — бак; *2* — патрубки; *3* — двигатель; *4* — трубчатый змеевик; *5* — насос; *6* — трубы. Стрелками обозначено движение воздуха

воды испарительная система охлаждения просуществовала недолго и быстро стала только достоянием истории. На смену испарительным системам пришли жидкостные охлаждающие системы.

Жидкостная охлаждающая система Е. А. Яковлева

Одним из первых, кто стал использовать такую систему охлаждения, был русский инженер Евгений Александрович Яковлев (1857—1898), лейтенант Российского флота, создатель отечественного двигателя внутреннего сгорания и один из конструкторов первого российского серийного автомобиля [3, 4].

В 1889 г. Е. А. Яковлевым был изготовлен первый двигатель внутреннего сгорания на жидком топливе. С докладом об этом изобретении Е. А. Яковлев выступил на заседании Совета II отдела Императорского Русского Технического общества, который вызвал большой интерес [5]. Председателем Совета был Кочубей Петр Аркадьевич — почетный член Петербургской Академии наук, один из создателей Музея прикладных знаний в Санкт-Петербурге, председатель Русского технического общества с 1870 по 1890 г.

На этом собрании Е. А. Яковлев рассказал, что двигатель четырехтактный, одноцилиндровый; вертикально расположенный цилиндр крепится к картеру и имеет съемную головку; камера сгорания Г-образной формы; поршень имеет съемное дно и четыре компрессионных кольца; коленчатый вал вращается в двух подшипниках скольжения; механизм распределения оборудован автоматическим впускным клапаном; выпускной клапан имеет механический привод; смазка осуществляется под давлением. У председателя возник вопрос "об охлаждении цилиндра. Так как взрыв происходит в самом цилиндре, температура которого очень высока, то для его охлаждения требуется порядочное количество воды, ... как вы думаете решить этот вопрос?"

Инженер Яковлев ответил, что "в тех случаях, когда нет водопроводов, вопрос решается тем, что ставятся резервуары с водой. Резервуар кровельного железа ставится на высоте цилиндра и затем соединяется с цилиндром двумя трубками: одна с низом бака и нижней частью цилиндра, а другая — с верхом бака и верхней частью цилиндра; таким образом получается циркуляционное охлаждение, потому что вода, нагреваясь в рубашке цилиндра, поднимается кверху и идет в бак, опускается и возвращается в цилиндр. Казалось бы, гораздо полезнее было бы устройство машины без охлаждения, так как много теряется на охлаждение. Но на самом деле выходит обратное: если не охлаждать цилиндр, то взрыв происходит слабее; я это объясняю тем, что воздух, поступая в цилиндр, моментально разряжается, вследствие чего не насасывается полное его количество, и приходится уменьшать также и количество керосина, — тогда сразу получается значительное расширение смеси, и взрыв не достигает должной силы. Из этого видно, что не следует стремиться к тому, чтобы строить газовые или керосиновые машины без охлаждения. В этом я убедился на собственном опыте" [6].

В дальнейшем система охлаждения с естественной циркуляцией охлаждающей жидкости получила название термосифонной.

Позже на основе жидкостной системы охлаждения, изобретенной Е. А. Яковлевым, была сконструирована система охлаждения двигателя автомобиля. В такой системе вода с помощью водяного насоса, установленного на двигателе, циркулировала по замкнутому контуру. Такая система охлаждения представляла собой жидкостный контур с выделенным охладителем. Циркуляция воды осуществлялась при помощи насоса. Для увеличения эффективности теплоотдачи трубчатый змеевик выполнялся ребристым по наружной поверхности трубы. Система охлаждения этого типа стала применяться и на автомобилях (рис. 2) [1].

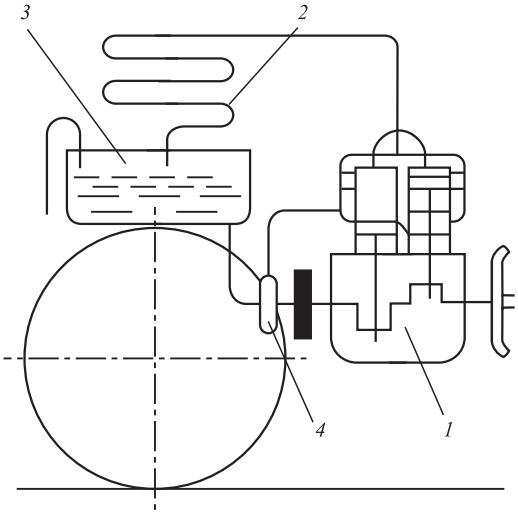

Рис. 2. Схема системы охлаждения автомобиля модели 1901 г.:

1 — двигатель; *2* — змеевик; *3* — бак; *4* — водяной насос

Системы радиаторного типа

С увеличением мощности двигателя потребовалось увеличить удельную тепловую мощность охладительной системы. Вода в баке нагревалась, происходило ее испарение, дополнение рабочего бака водой из резервного бака не обеспечивало эффективного охлаждения двигателя.

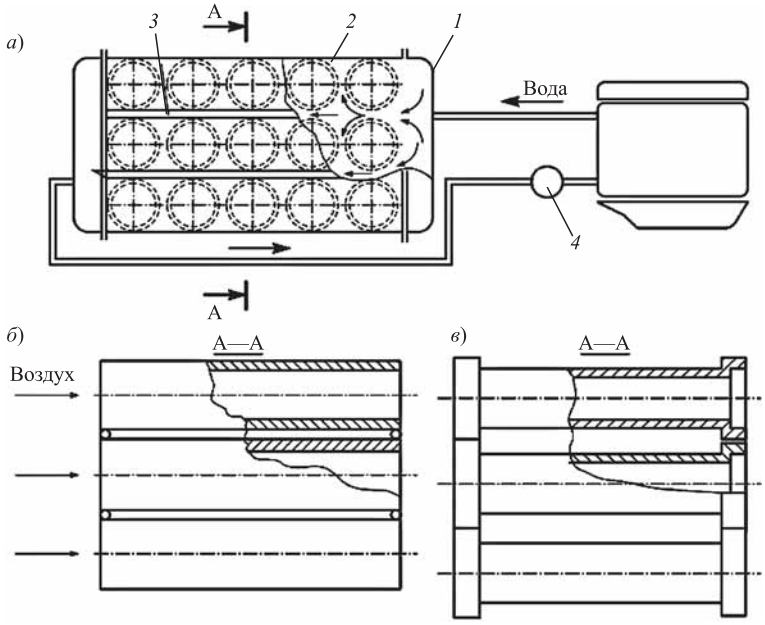

Рис. 3. Охладитель кожухо-трубный типа "вода—воздух":

а — общая схема; *б* — со стержневым разделителем труб; *в* — концы труб развальцованы

В 1897 г. на автомобиле модели "Даймлер-Феникс" была представлена система охлаждения, в которой в бак со змеевиком перпендикулярно ему были установлены полые трубы. Проходивший по трубам воздух охлаждал воду в баке, что повышало эффективность охлаждения двигателя. Охладитель со змеевиком и каналам для циркуляции воздуха в баке явился аналогом водяного радиатора.

В 1900 г. компания "Даймлер моторен" разработала охладитель трубчатого типа (рис. 3), в котором ряды трубок *2* с круглым или квадратным сечением по торцам разделялись металлическими стержнями *3* диаметром 3—5 мм, торцы трубок были спаяны и составляли сердцевину.

По торцам сердцевины крепились баки *1*. Охладитель устанавливался на автомобиле так, что вода горизонтально циркулировала по зазорам, образуемым при установке стержней между трубками. Циркуляция воды осуществлялась с помощью водяного насоса *4*. Воздух, проходивший по трубам перпендикулярно охлаждающей жидкости, эффективно охлаждал воду. Охладитель такого типа назван радиатором (от лат. radio — испускать лучи, излучатель) [7]. Новый охладитель обладал компактностью, меньшей массой и более высокой тепловой эффективностью. Это техническое решение охлаждающей системы двигателя явилось значимым техническим достижением в автомобилестроении и было высоко оценено всеми производителями автомобилей. Конструкция и технология изготовления радиатора в последующие годы дорабатывалась, но идеи, заложенные изначально, сохранялись.

Следующим шагом в совершенствовании радиатора стало изобретение так называемого сотового радиатора. Торцы трубок развальцовывались и выполнялись в форме квадратов или шестигранников. Создание радиаторов сотовой конструкции — первый этап развития систем охлаждения двигателей.

Одна из составляющих систем охлаждения — водяной насос (помпа). Он обеспечивает циркуляцию жидкости по жидкостному контуру системы. Водоподающие насосы использовались еще в глубокой древности (например, для полива). Наиболее близким аналогом центробежного водяного насоса, используемого в двигателях, считается гидротурбина. В 1832 г. французский инженер Л. Фурнерон предложил конструкцию

турбины, направляющее колесо которой было оснащено оригинальными спиральными лопатками. Спиральный контур лопаток обеспечивал траекторию движения воды по контуру лопаток от центра к наружной кромке колеса таким образом, чтобы обеспечивалось максимальное значение напора и энергии на турбинном колесе.

Изобретение А. А. Саблукова

Другой важной составляющей системы охлаждения является вентилятор [8]. Первый вентилятор, по устройству приближенный к современным радиальным вентиляторам, в 1835 г. сконструировал и изготовил русский инженер Александр Александрович Саблуков (1783—1857). Этот прибор применялся для подачи воздуха в шахты рудников на Алтае, в последующем для тех же целей А. А. Саблуковым был предложен и осевой вентилятор [9]. В системах охлаждения автомобилей и тракторов вентиляторы начали применять одновременно с сотовыми радиаторами — уже в 1911 г.

Свои изобретения А. А. Саблуков описывает в "Мемуарах о некоторых применениях конструкций машин, известных под названием вентиляторов или веялок, и о новом приложении того же принципа для передвижения жидких тел", опубликованного на французском языке в Париже в 1841 г.

В 1833 г. А. А. Саблуков разработал вентилятор с двусторонним всасыванием. Он пишет в "Мемуарах": "Установив полезность своего аппарата, я занялся расширением его применения для других целей и стал разрабатывать конструкцию более удобную для различных условий. В 1833 г. я построил аппарат диаметром 48 дюймов и шириной 18 дюймов с четырьмя лопастями. В нем были устроены отверстия, геометрически закрытые двумя всасывающими трубками, соединенными далее в одну трубу, в которую вытягивался воздух. Вся конструкция была изготовлена из тонких досок, за исключением железной оси. Установка оказалась очень удачной — она пропускала 1200 футов воздуха в минуту. Я назвал этот аппарат центробежным вентилятором" [10] (рис. 4).

Интересно отметить, что помимо центробежного вентилятора, А. А. Саблуков впервые изобрел и винтовой вентилятор. В "Мемуарах" он пишет: "В 1835 г. я построил аппарат, назначение которого было такое же, как и вентилятора с лопастями, но основанного на совершенно ином принципе, а именно, на принципе Архимедова винта". Далее А. А. Саблуков объясняет основные преимущества винтового вентилятора по сравнению с центробежным. К таким преимуществам он относит малый вес, простоту конструкции, дешевизну изготовления и т. д. Вентиляторы Саблукова нашли применение во многих отраслях промышленности.

А. А. Саблуков был не только выдающимся изобретателем, но и активным общественным деятелем. Он всячески способствовал распространению технических знаний в России. В течение десяти лет (1835—1845) А. А. Саблуков являлся председателем IV отделения Российского вольного экономического общества. В этот период

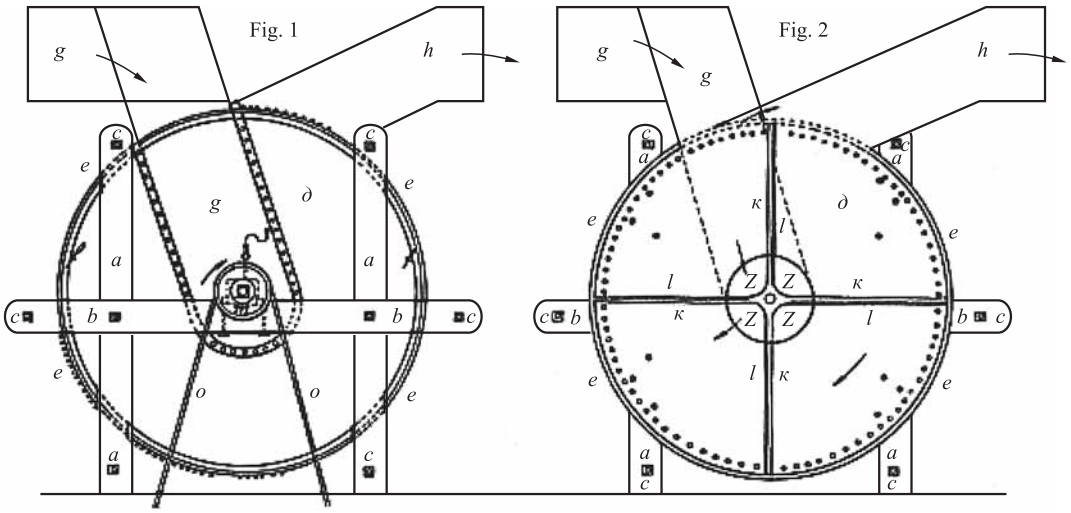

Рис. 4. Чертеж центробежного вентилятора конструкции А. А. Саблукова

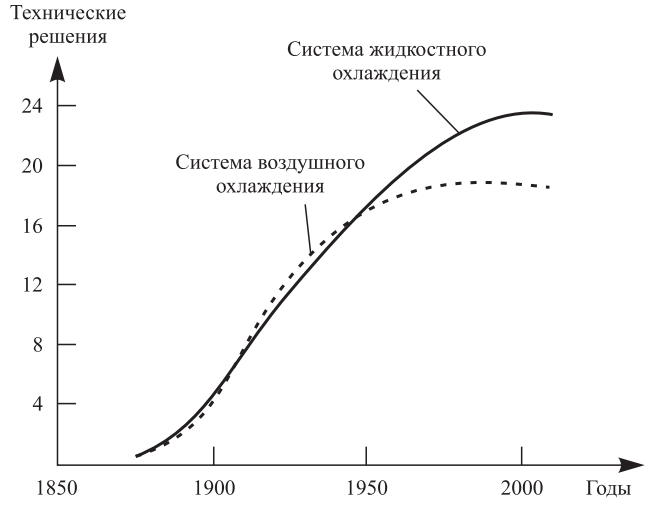

Рис. 5. Техническая эволюция систем охлаждения

А. А. Саблуков развил необыкновенно большую энергию по подготовке русских механиков. Им было внесено предложение об учреждении училища практической механики в Санкт-Петербурге.

В системах охлаждения автомобилей вентиляторы начали применять одновременно с сотовыми радиаторами уже в 1911 г. [8].

Можно показать, что система охлаждения, как и другие технические устройства, развивается циклически [11]. Последовательная смена этапов показывает смену поколений системы, ее постоянное усложнение и формирование нового качества функционирования. Рассматривая график развития (рис. 5), следует отметить, что формирование настоящей системы охлаждения как технического устройства, обеспечивающего эффективное охлаждение двигателя, закончилось к концу 1980-х гг. Система охлаждения настоящего времени включает технические решения всего цикла развития. От зарождения первых образцов системы до широкого использования ее на тракторах и автомобилях и другой мобильной техники прошло более 100 лет. Эти временные рамки включают все этапы развития системы, которые в целом соответствуют общим тенденциям развития техники.

Нынешнее столетие характеризуется стремительным развитием новых научных направлений, основу которых составляют информационные технологии. В связи с этим можно полагать, что развитие информационных технологий является предпосылкой революционного развития техники, в том числе и систем охлаждения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Якубович А. И., Кухаренок Г. М., Тарасенко В. Е.** Системы охлаждения тракторных и автомобильных двигателей. — Минск.: Инфа-М, 2014. 453 с.
2. **Гаврилов А. К.** Системы жидкостного охлаждения автотракторных двигателей. — М.: Машиностроение, 1966. 163 с.
3. **Смык А. Ф., Спиридонова Л. В., Спиридонов А. А.** Из истории создания отечественных двигателей внутреннего сгорания // История науки и техники. — 2015. — № 11. — С. 24—32.
4. **Смык А. Ф., Спиридонов А. А.** Формирование теории и конструктивные особенности поршневых двигателей внутреннего сгорания // История науки и техники. — 2016. — № 7. — С. 17—31.
5. **Смык А. Ф., Спиридонова Л. В., Спиридонов А. А.** Императорское русское техническое общество и развитие двигателестроения в России // Грузовик. — 2016. — № 6. — С. 33—41.
6. **О керосиновых двигателях** системы Яковлева Е. А.: Труды заседания II отдела Императорского Русского Технического общества. — СПб.: Типография бр. Пантелеевых, 1891. 22 с.
7. **Бабичев В. З.** Автомобильные радиаторы. — М.: Машгиз, 1951. 158 с.
8. **Калинушкин М. П.** Вентиляторные установки. — М.: Высшая школа, 1979. 183 с.
9. **Татаринов М. П.** Александр Александрович Саблуков. — М.: Углетехиздат, 1952. — 64 с.
10. **Alexandre de Sablouhoff**. Memoire pour le displacement des corps liquids. — Paris, 1841.
11. **Батурин О. В., Батурин Н. В., Матвеев В. Н.** История изобретения и развития агрегатов наддува двигателей внутреннего сгорания. — Самара: Изд-во Самарского государственного аэрокосмического университета, 2009. — 59 с.

УДК 656.017

Янчевский В. А., канд. техн. наук, доцент, **Махов С. Г.,** аспирант, МАДИ
E-mail: torvald33@hotmail.com

УГЛУБИТЬ РИСУНОК ПРОТЕКТОРА ГРУЗОВОЙ ШИНЫ ИЛИ НАВАРИТЬ НОВЫЙ — ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ

Рассмотрены варианты продления ресурса автомобильных шин нарезкой или наваркой после того, как изношен протектор. Сделано сопоставление удельных затрат таких шин в руб./1000 км. Рассмотрено, почему нарезка протектора применяется нашими транспортниками в ограниченных масштабах.

Ключевые слова: *шины regroovable, влияние шин на расход топлива, восстановление шин, нарезка протектора.*

The options for extending the life of automobile tires by regrooving or retreading after the tread is worn are considered. The unit costs of such tires in rubles/1000 km are compared. It is considered why regrooving of the tire is carried out by our fleet operators as a limited.

Keywords: *regroovable tires, Influence of the tire on fuel consumption, tire retreading, tire regrooving.*

(Рисунки на 2—4-й полосах обложки)

Расходы автотранспортного предприятия в значительной степени определяются затратами на материально-техническое обеспечение подвижного состава. Это топливо, запасные части, эксплуатационные материалы, шины. Расход топлива в некоторой степени зависит от типа шин и, всегда, от состояния протектора. Чем больше изношен протектор, тем меньше сопротивление качению и, следовательно, расход топлива (рис. 1).

В затратах на материально-техническое обеспечение (МТО) затраты на шины обычно соизмеримы с затратами на эксплуатационные материалы (рис. 2). Но шины имеют некоторую особенность, что делает их часто приоритетными в выборе ресурсосберегающих технологий.

По ценам рынка нынешнего периода на каждые, например, 100 автобусов затраты на шины в год составляют 7...10 млн руб. Многочисленные исследования показывают, что потери ресурса при этом постоянно держатся на уровне 10...15 %. Значит 1,0...1,5 млн руб. расходуется нерационально. Номенклатура шин как учетная единица склада немногочисленна, за их техническое состояние в парке ответственны 2—3 чел., при этом во многих случаях достаточен визуальный контроль.

Ресурс шины, если не произошло ее механическое повреждение, определяется долговечностью протектора. Его стоимость не более 20 % общей стоимости шины. Остальные 80 % приходятся на так называемый каркас (термин не технический, но широко используемый на практике). Это сложная конструкция из резины, металлической проволоки, текстиля, композитных материалов и пр. Все эти 80 % стоимости в большинстве случаев отправляются на свалку.

С 60-х годов прошлого века продление ресурса шины проводится наложением нового протекторного слоя сырой резины с последующей его вулканизацией ("горячий" способ). В 80-е стал широко применяться ("холодный" способ) — наложение на шину готовой профилированной протекторной ленты (иногда даже кольца). Эти шины получили рабочее название — восстановленные или наварные. По литературным источникам в развитых странах в эксплуатации находится примерно 40 % восстановленных шин. Объяснение простое — стоимость единицы пробега на качественно восстановленных шинах почти в 2 раза ниже, чем на шинах новых, что и обосновывает их широкое использование.

В отечественной транспортной практике отношение к восстановлению шин неоднозначно. В основном это связано с низким качеством ремонта. При малой реализации ресурса такими шинами их использование оказывается неэффективным.

Лет 30 назад для большинства современных грузовых шин (автобусные входят в этот класс) появилась возможность продления долговечности протектора путем углублении его рисунка (нарезкой). Это шины имеют на боковине надпись "REGROOVABLE". Для дорог с твердым покрытием рынок предлагает их не менее 95 %. Шина Regroovable от "обычной" отличается тем, что у нее первоначальная глубина канавок рисунка протектора *t* на 3...4 мм меньше. При этом общая толщина протекторного слоя остается во многих случаях неизменной (рис. 3).

При износе исходного рисунка его некоторые канавки можно углубить (нарезать) на 2,5...4 мм (по рекомендации разработчика шины). Эффективность применения таких шин объяснена ниже приведенной графической моделью (рис. 4).

Линия *1* отображает темп износа протектора обычной шины с первоначальной $t = 20$ мм. При достижении предельной $t_{ост} = 2$ мм, ресурс шины соответствует точке $L_о$. Закономерность износа не линейная. Чем меньше остаточная глубина рисунка протектора $t_{ост}$, тем больший пробег выполняет шина при изнашивании своего 1 мм. Объяснение этому следующее. Чем выше грунтозацеп протектора, тем сильнее он деформируется и вибрирует. Это увеличивает сопротивление качению и, следовательно, расход топлива (см. рис. 1).

Линией *2* (см. рис. 4) отображена шина Regroovable, имеющая первоначальную глубину рисунка протектора 16 мм. Темп износа ее протектора тождественен характеру линии *1* при износе от 16 мм и менее (зона фигурной скобки на рис. 4). Если шину эксплуатировать без нарезки до $t_{ост} = 2$ мм, то ее ресурс соответствует точке $L_{бн}$. Если, как рекомендуют многие изготовители шин, сделать нарезку примерно при $t_{ост} = 5$ мм, углубив протектор на 3 мм, то получим $t_{ост} = 8$ мм. Темп износа протектора на участке кривой *3* тождественен характеру линии *1* (см. рис. 4) при износе от 8 мм и менее. Ресурс шины будет соответствовать точке $L_{сн}$. Суммарно изношено 17 мм (у обычной шины — 18 мм). Но элементы протектора шины Regroovable работают в менее напряженном режиме, поэтому величина $L_{сн}$ больше, чем $L_о$.

Как показывают расчеты, работа шин Regroovable на уменьшенных величинах $t_{ост}$ снижает расход топлива в среднем на 2,5 %. Для 100 автобусов это экономия 1,5 млн руб. в год.

Наши транспортники к использованию этих шин относятся настороженно, что приводит к значительным финансовым потерям. Это 2...3 тыс. руб. по каждой шине, которой углубление протектора не сделали.

Отказ от нарезки часто объясняют отсутствием официальных разрешительных документов на выполнение этого вида технологического воздействия. Но этого и не требуется. Есть только ограничения на применение шин по осям автомобиля (табл. 1). Также опасаются снижения прочностных свойств шины. Но резина протектора, как и других элементов шины, не предназначена обеспечивать ее прочностные свойства. Назначение резины — соединение отдельных конструктивных элементов, обеспечение защиты от внешнего воздействия, герметизация.

В среду транспортников некоторыми "конторами", которые предлагают нарезку, лет двадцать назад было вброшено мнение, что нарезка должна выполняться специалистом (читай — "специалистом от данной конторы" — безобидная маркетинговая хитрость). Возможно, водитель — владелец грузового автомобиля — не является этим условным специалистом, хотя ограничений по выполнению им других технологических воздействий с автомобилем нет. А работник шиномонтажного участка, он что, не специалист? Человеку доверена вулканизация камер, ремонт повреждений бескамерных шин — это более ответственные операции.

Разработчики шин указывают только на необходимость соблюдения технических условий. Это глубина и ширина нарезаемой канавки, в миллиметрах, согласно схемам нарезки, которые есть в технической документации, сопровождающей продажу шин (рис. 5).

Прибор для нарезки представляет собой понижающий трансформатор (рис. 6), и стоит как 2—3 грузовые шины. Ножи для нарезки продаются комплектами, часто по 20 шт. (500...700 руб.). Одного ножа, в зависимости от опыта работника и сложности рисунка протектора, хватает на 1—3 шины.

Шину рекомендуют демонтировать (все-таки это баллон с повышенным давлением воздуха, который может иметь внутренние эксплуатационные повреждения, взрыв шины — очень опасен, но не нарезка — причина этого). По некоторым публикациям, в реальности, шины иногда нарезают и непосредственно на автомобиле (рис. 7).

Следует отметить, что поскольку работа шины на углубленном протекторе продлевает ее время нахождения в эксплуатации, то увеличивается вероятность механического повреждения. Снижается количество шин, направляемое в "наварку". Данное суждение не однозначно. Результат

Таблица 1

Условия технического регламента Таможенного союза (ТР ТС 018/2011) "О безопасности колесных транспортных средств" п. 5.8.3. Комплектация автомобиля с отремонтированными местными повреждениями и шинами, имеющими маркировку "Regroovable" после нарезки протектора (╬ — допустимо)

Код	Тип транспортного средства (ТС)	Ось ТС		
		Передняя	Средняя	Задняя
M1	ТС для перевозки пассажиров, имеющие, помимо места водителя, не более восьми мест для сидения — легковые автомобили			╬
M2	ТС для перевозки пассажиров, имеющие, помимо места водителя, более восьми мест для сидения, технически допустимая максимальная масса которых не превышает 5 т			╬
M3	ТС для перевозки пассажиров, имеющие, помимо места водителя, более восьми мест для сидения, технически допустимая максимальная масса которых превышает 5 т		╬	╬
N(1-3)	ТС для перевозки грузов (до 3,5 т (12 т) и выше) — автомобили грузовые и их шасси		╬	╬
O	Прицепы (полуприцепы) к транспортным средствам категорий L, M, N	╬	╬	╬

зависит от соотношения ресурсов новых и восстановленных шин, от конструктивных особенностей некоторых моделей.

В табл. 2 приведено сопоставление эффективности двух стратегий:

— оценка суммарного пробега шины на исходном протекторе и на восстановленном;

— оценка суммарного пробега шины на исходном протекторе с учетом его нарезки.

Критериями сопоставления являются не "привычные" ресурсные показатели — пробеги шины фактические и нормативные, а удельные затраты (руб/км), что является единственным объективным показателем эффективности эксплуатации шин.

По "нарезке" приняты следующие показатели: работа проводится персоналом автопредприятия, глубина нарезки — 3 мм, дополнительный пробег — 10 тыс. км/1 мм, стоимость нарезки 200 руб.

Таблица 2

Сопоставление удельных затрат на эксплуатацию шин 275/70 R22.5 в 2017 г. (на примере автобусного парка Московского региона)

Наложение нового протектора		
Шины новые	Шины восстановленные	Суммарно
$C_{нов}$ = 11,5 тыс. руб.	$C_{восст}$ = 6,0 тыс. руб.	$C_{нов} + C_{восст}$ = 17,5 тыс. руб.
$L_н$ = 149,9 тыс. км	$L_{восст}$ = 83,8 тыс. км	$L_н + L_{восст}$ = 233,7 тыс. км
$C_{уд}$ = 76,7 руб/1000 км	$C_{уд}$ = 71,6 руб/1000 км	$C_{уд}$ = 74,9 руб/1000 км
Углубление рисунка протектора		
Шины новые	Шины после нарезки	Суммарно
$C_{нов}$ = 11,5 тыс. руб.	$C_{нарезки}$ = 200 руб.	$C_{нов} + C_{нар}$ = 11,7 тыс. руб.
$L_н$ = 149,9 тыс. км	$L_{нарезки}$ = 30,0 тыс. км	$L_н + L_{нарезки}$ = 179,9 тыс. км
$C_{уд}$ = 76,7 руб/1000 км	$C_{уд}$ = 6,7 руб/1000 км	$C_{уд}$ = 65,1 руб/1000 км

(термонож, амортизация оборудования, стимулирующая надбавка исполнителю).

В рассматриваемом варианте восстанавливать шины экономически не выгодно из-за низкой реализации ресурса после восстановления. При увеличении ресурса ситуация меняется. В количественном выражении это показывает графическая модель (рис. 8).

Данная модель представлена на примере одиночной шины. При работе с партией шин следует учитывать, что чем дольше шина находится в эксплуатации, тем больше повышается вероятность ее повреждения, вероятность стать неремонтопригодной к наварке (рис. 9). Рекомендации на этот счет сейчас находятся в стадии разработки.

Для экономической оценки выбора эффективного пути реновации протектора требуются некоторые отчетные (статистические) данные предприятия. Существующая система учета шин предоставить их не может. С момента своего создания (40-е годы XX века) и до настоящего времени система эта в основном работает не на техническую службу, а на бухгалтерию. Согласно современным тенденциям требуется ее некоторая "оптимизация".

Но даже на данном этапе можно утверждать, что отказ от нарезки шин на наших автопредприятиях ничем не обоснован. Это — потеря выгоды. Ограничений на внедрение технологии нарезки нет. Следует только соблюдать рекомендации производителя шин.

В МАДИ исходным приемам нарезки протектора студенты обучаются за 20 мин лабораторных занятий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Янчевский В. А.** Технический сервис в решении экономико-экологической проблемы с шинами в городском хозяйстве / В. А. Янчевский // Сборник трудов научно-практической конференции ЮЗАО Москвы. — 2006. — С. 16—19.
2. **Жижаев А. Н.** Экономика и экология автомобильной шины // Коммерческий транспорт — 2002 — № 2. — С. 37—39.
3. **Кнороз В. И.** Работа автомобильной шины. — М.: Транспорт, 1976. — 239 с.
4. **Янчевский В. А., Янчевская Е. В., Махов С. Г.** К вопросу вторичного использования автомобильных шин // Автотранспортное предприятие. — 2015. — № 3. — С. 36—40.

Студентам продемонстрировали возможности автотехники КАМАЗ

На испытательном полигоне КАМАЗа состоялась презентация технических возможностей тяжелого ряда автомобилей КАМАЗ, организованная для студентов-целевиков и руководителей учебных заведений Набережных Челнов.

Сейчас договоры целевой подготовки с КАМАЗом заключены у 350 студентов вузов и ссузов. Многие ребята, получающие высшее образование, после прохождения практики приглашаются поработать в подразделениях компании на полставки. На примере реального производства проще добрать необходимые знания. "Пора студентам увидеть КАМАЗы в деле, нужно показать им технику, которая работает в экстремальных условиях", — пояснил цель мероприятия первый заместитель генерального директора КАМАЗа — исполнительный директор Юрий Герасимов.

В испытаниях на полосе препятствий участвовали двухосный КАМАЗ-4326, трехосный КАМАЗ-43114 и четырехосный КАМАЗ-63501. Автомобили преодолевали препятствия разного уровня сложности: легко заезжали на крутую гору, поднимались по лестничным ступенькам, выезжали из глубокого рва с водой и продолжали свой путь.

"Демонстрация возможностей камазовской техники впечатляет и восхищает. Теперь наши учащиеся знают, для чего нужна крепкая сварка и точная обработка деталей на станках", — уверена замдиректора Набережночелнинского политехнического колледжа Светлана Квятковская.

"КФУ плотно интегрирован в развитие КАМАЗа как в области подготовки кадров, так и научно-технических разработок. В легком преодолении большегрузом препятствий есть и наша заслуга", — отметил директор Набережночелнинского института КФУ Махмут Ганиев.

Студентам предоставили возможность не только посидеть в кабине, но и прокатиться по треку, на котором наматывают свои первые километры все КАМАЗы, сходящие с главного сборочного конвейера автомобильного завода. Молодые специалисты внимательно осмотрели новый грузовик КАМАЗ-54901 — первый представитель автомобилей поколения К5. В уже готовой машине каждый стремился найти тот узел, в проектировании и изготовлении которого он принимал участие.

Пресс-служба ПАО "КАМАЗ"

УДК 628.517.2

А. А. Строкин, канд. техн. наук, доцент, Московский государственный университет им. Н. Э. Баумана
E-mail: strokin.anatolij@yandex.ru

"ГУЛКИЕ" ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ПОМЕЩЕНИЯ И ОПЫТ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ОБОРУДОВАНИЯ

В статье излагается опыт проведения исследований по снижению шума оборудования при одновременном измерении всего комплекса параметров, характеризующих его работу. Работы проводились в "гулких" акустически неблагоприятных производственных помещениях-боксах, акустические параметры которых при необходимости улучшались вследствие увеличения звукоотражающей способности ограждающих конструкций. Такой подход обладает существенными преимуществами с точки зрения стоимости, трудоемкости, безопасности и, в итоге, результативности — при необходимости улучшения как акустических, так и одновременно других эксплуатационных характеристик исследуемых машин. Рассмотрена также вероятностная модель реверберационных полей в таких помещениях и оговорены ограничения в применении излагаемого подхода.

Ключевые слова: *уровень звуковой мощности, уровень звукового давления, уровень звука, показатель направленности, заводской стенд, комплексные измерения.*

The article describes the experience of research to reduce the noise of the equipment while measuring the entire set of parameters characterizing its operation. The work was carried out in the booming industrial premises-boxes, the acoustic parameters of which, if necessary, were improved by increasing the sound-reflecting ability of the enclosing structures. This approach has significant advantages in terms of cost, complexity, safety and, as a result, efficiency — if necessary, to improve both acoustic and at the same time other operational characteristics of the studied machines. Also considered a probabilistic model of the reverberation field in these areas and the agreed limitations in the application of this approach.

Keywords: *sound power level, sound pressure level, A-weighted sound pressure level, directivity index, factory stand, complex measurements.*

Введение

Проблема снижения шума, которая стоит перед разработчиками оборудования, а также, довольно часто, и перед персоналом, его эксплуатирующим, является двуединой задачей, ибо необходимо создать акустически благоприятный климат и одновременно обеспечить (или сохранить) высокие эксплуатационные параметры работающего оборудования.

В настоящей статье излагается опыт таких работ, которые проводились в так называемых "гулких" производственных помещениях (на стендах, в испытательных боксах и т. д.), ограждающие поверхности которых обладали высокой звукоотражающей способностью. Как известно [1, 2], основными параметрами, наиболее полно и объективно характеризующими шум оборудования, являются — уровень ее звуковой мощности $L_W = f(f)$, дБ и показатель направленности $DI = f(f)$, дБ в функции от частоты f, Гц излучения. При этом необходимость измерения (исследования) характеристик направленности при проведении работ по снижению шума оборудования существенно влияет на выбор метода измерения шума и может значительно усложнить и удорожить процедуру как акустических измерений, так и других (не менее важных) его эксплуатационных показателей [2].

С другой стороны, рассмотрение физического процесса формирования направленности излучения шума исследуемым объектом (оборудованием)

нередко позволяет заранее оценить необходимость проведения таких усложненных измерений и в ряде случаев упростить процесс оптимизации всего комплекса параметров при соответствующей доводке оборудования на испытательных стендах. Факторы, влияющие на необходимость учета (или не учета) характеристик направленности шума оборудования, были рассмотрены в работах [2, 3]. В тех случаях, когда не следует ожидать существенных значений показателя направленности или из существа процесса шумообразования вообще не следует ожидать направленности звука (например, когда нет когерентных источников излучения) и, следовательно, измерение показателя направленности будет нести избыточную информацию, возможно использование таких технических и ориентировочных методов измерения акустических параметров, которые значительно упрощают всю процедуру доводки оборудования. При этом сам процесс испытаний и совершенствования оборудования становится не только проще, дешевле и безопаснее (в частности, в противопожарном отношении), но и позволяет осуществлять заявленную цель — одновременной доводки параметров оборудования по всему комплексу паспортных характеристик. На производстве такие работы возможно проводить на стендах, уже оборудованных для замера эксплуатационных параметров машин, которые не сложно дооборудовать и сделать из них "гулкие" помещения. Однако, следует заметить, что качество акустических измерений зависит прежде всего от качества отраженного (реверберационного) поля таких помещений (реверберация — означает "послезвучание", т. е., когда источник звука уже выключен, а звук в виде "эховых" отражений, затухая, еще "гуляет" по помещению). Как известно, для качественного отраженного поля характерна хаотическая дифракционная картина распространения звуковых волн, при этом можно считать все звуковые лучи равноправными (прямой луч от источника звука тоже не имеет никакого преимущества перед любым отраженным), а перенос звуковой энергии по любому направлению — равновероятным. В связи с этим рассмотрим несколько подробнее некоторые особенности таких полей и их соответствующие характеристики.

Вероятностная модель акустических процессов в отраженном поле "гулких" помещений

Пусть источник шума находится в "гулком" помещении. Вблизи него будет находиться ближняя зона прямого звука, т. е. пришедшего от различных колеблющихся элементов источника. В этой зоне устойчивая картина излучения еще не сформировалась и источник даже в первом приближении нельзя считать точечным. По мере удаления от источника (при $r > 2l_{max}$, где l_{max} — характерный максимальный размер источника звука, а r — расстояние от источника) формируется дальнее звуковое поле прямого звука, причем звуковое давление p в прямом звуковом луче ослабевает обратно пропорционально расстоянию r от источника (излучателя): $p \sim 1/r$, а доля отраженного звука (по энергии) по мере удаления точки контроля от источника увеличивается.

В итоге в помещении можно найти пространственную зону, где все звуковые лучи, пришедшие в любую точку данной зоны, практически равноправны. Такое отраженное поле называют однородным, или реверберационным, чтобы подчеркнуть значение отраженных волн в этой зоне (рис. 1). Здесь условно объемное пространство в "гулком" помещении обозначено штрихпунктирной линией. Соответственно плотность звуковой энергии, ε_0, Дж/см^3 в такой зоне (в случае идеального реверберационного поля) остается постоянной. Это основное свойство идеального

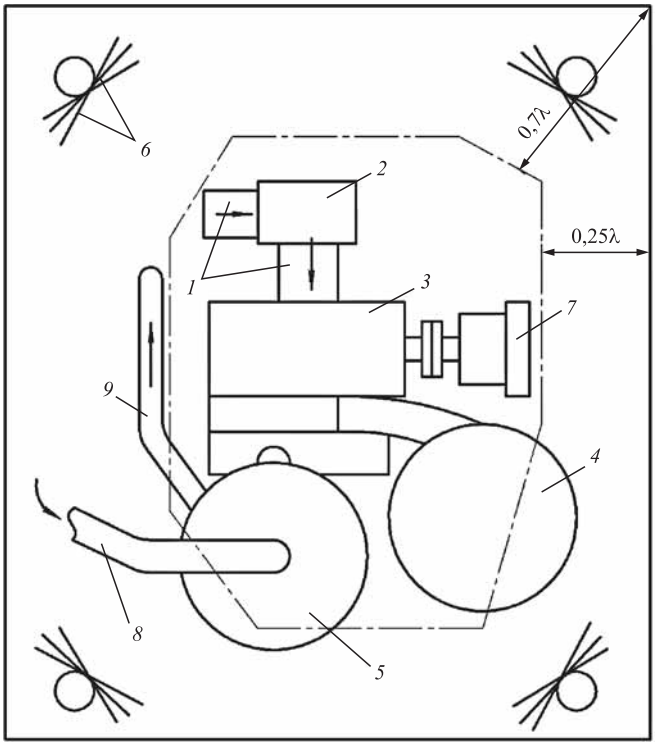

Рис. 1. Схема установки для разделения источников шума двигателя

однородного отраженного реверберационного поля. Как следствие, в таком идеальном поле имеют место одинаковые уровни звукового давления L_p, дБ или разность ΔL_p, дБ между уровнями звукового давления, измеренных в двух различных точках данной зоны, должна равняться нулю. Это свойство идеального однородного отраженного поля представлено в виде уравнений (1):

$$\varepsilon_0 = \text{const};\ L_p = \text{const};\ \Delta L_p = 0. \qquad (1)$$

Конечно, в реальных звуковых полях "гулких" помещений имеет место неравномерность звукового давления. Приемлемой для наших целей можно считать неравномерность ΔL_p =2...3, дБ. По этому же критерию можно установить и ориентировочные границы зоны отраженного реверберационного поля помещения, пройдя с микрофоном по трем взаимно перпендикулярным направлениям по объему помещения при включенном каком-либо широкополосном источнике шума (например, для этого можно использовать широкополосный шум вентилятора, снабженного глушителями, убирающими регулярную составляющую вентиляционного шума). Следует также отметить, что в "гулких" помещениях зона отраженного поля занимает значительный объем, что создает определенные преимущества для акустических измерений. Кроме того, качественное отраженное поле обладает также свойством изотропности. Это свойство означает, что усредненные значения потоков звуковой энергии, распространяющиеся по различным направлениям, можно считать равновероятностно одинаковыми. Причем все описанные выше свойства реверберационной зоны помещения, в том числе и изотропность, возникают вообще вследствие хаотической, равновероятностной картины распространения в ней звуковых волн по любому направлению. Безусловно также, что плотность звуковой энергии ε_0, Дж/м^3 в любой точке в таком звуковом поле будет зависеть от звуковой мощности W, Вт источника шума, установленного в помещении. Рассмотрим эту связь, так как звуковая мощность в функции от частоты излучения $W = f(f)$, Вт является наиболее объективной и важной шумовой характеристикой оборудования.

Предварительно определим время "свободного пробега" звуковой волны в помещении. Пусть помещение имеет объем V, м^3. В отраженном поле этого объема (см. на рис. 1 область, окантованную штрих-пунктирной линией) выделим элементарную площадку dS и пусть на эту площадку под углом θ к нормали n элемента dS падает звуковая волна. Какова вероятность того, что за время dt

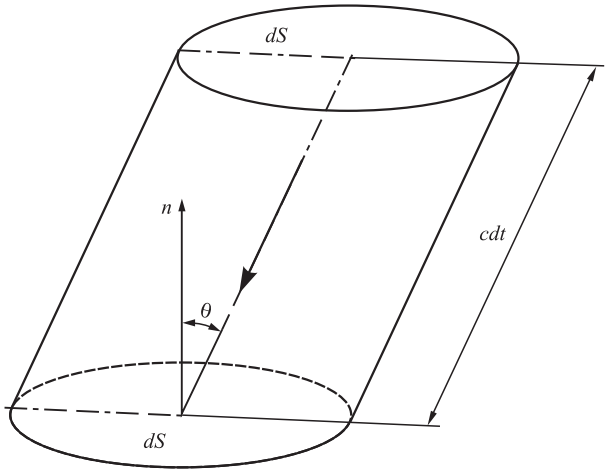

Рис. 2. Схема определения вероятности падения волны на площадку *dS* за время *dt*

волна упадет на площадку dS? На эту площадку за время dt может упасть под углом θ только та звуковая энергия, которая содержится в объеме цилиндра (рис. 2) с основанием dS и высотой $cdt\cos\theta$, где c — скорость звука. Объем этого цилиндра есть:

$$dV = cdt\cos\theta dS. \qquad (2)$$

Тогда вероятность того, что звуковая энергия, содержащаяся в объеме dV и распространяющаяся под углом θ, за время dt упадет на площадку dS, будет равна отношению объема dV ко всему объему помещения:

$$B_1 = 1/2dV/V = 1/2(cdt\cos\theta dS)/V. \qquad (3)$$

Множитель 1/2 объясняется тем, что движение волны под углом θ может с равной вероятностью происходить как по направлению к площадке dS, так и в противоположном направлении. Поскольку нас интересует попадание волны на площадку dS по направлению, изображенному на рис. 2, движение волны в противоположном направлении принимать не следует.

Рассмотрим теперь, какова вероятность того, что некоторая, наудачу выбранная волна будет двигаться под углом θ к площадке dS. Для определения этой вероятности окружим площадку dS (рис. 3) полусферой произвольного радиуса R и выделим на полусфере поясок с площадью $2\pi R\sin\theta Rd\theta$. Здесь $2\pi R\sin\theta$ — длина окружности пояска, а $Rd\theta$ — его ширина.

Вероятность падения волны под углом, лежащим между θ и θ + $d\theta$, есть отношение площади пояска к поверхности полусферы:

$$B_2 = 2\pi R\sin\theta Rd\theta/2\pi R^2 = \sin\theta d \qquad (4)$$

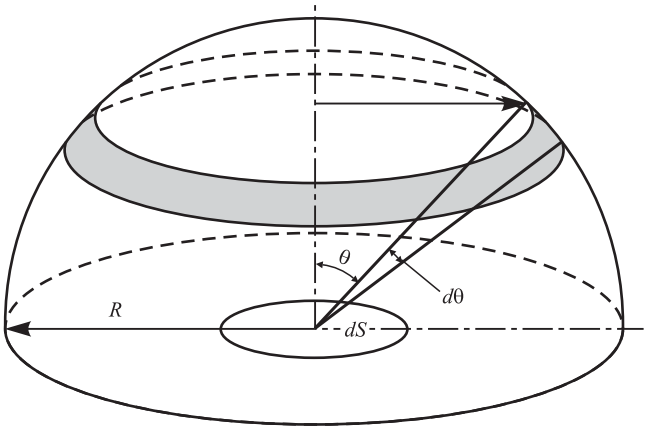

Рис. 3. Схема для определения вероятности падения волны под углом θ на площадку *dS*

Вероятности B_1 и B_2 взаимно независимы, поэтому результирующая вероятность найдется из произведения:

$$B_3 = B_1 B_2. \quad (5)$$

Таким образом, вероятность падения звуковой волны на площадку dS за время dt под углом, лежащим между θ и θ + $d\theta$, будет равна:

$$B_3 = 1/2c\cos\theta\sin\theta d\theta/VdtdS. \quad (6)$$

Вероятность же падения звука на dS под любым углом в пределах от 0 до π/2 получится путем интегрирования выражения (6) по θ:

$$B_4 = \int_0^{\pi/2} 1/2\, cdtdS/V \cos\theta\sin\theta d\theta = 1/4\, cdtdS/V. \quad (7)$$

Наконец, вероятность падения звука за время dt под любым углом и на любой элемент поверхности S, ограничивающей объем помещения V, есть:

$$B_5 = cdt/4V \int dS = cS/4Vdt. \quad (8)$$

Эта вероятность пропорциональна интервалу времени dt. Увеличивая интервал времени, можно получить такой промежуток времени τ, в пределах которого падение звука на какую-либо точку поверхности S должно произойти непременно. Так как вероятность достоверного события равна единице, то интервал τ найдется из условия:

$$cS/4V\tau = 1. \quad (9)$$

Откуда:

$$\tau = 4V/cS. \quad (10)$$

Таким образом, среднее вероятностное время между двумя последовательными отражениями звука зависит при постоянной скорости распространения звуковой волны — только от размеров помещения.

Пусть теперь при каждом отдельном акте отражения звука поверхность поглощает среднюю величину энергии, равную ΔE, Дж. Если при этом весь запас звуковой энергии в помещении равен E, Дж, то средний коэффициент звукопоглощения $\bar{\alpha}$ будет равен отношению:

$$\bar{\alpha} = \Delta E/E. \quad (11)$$

и, соответственно, общее звукопоглощение помещения A, м^2 (поскольку поглощаемая звуковая энергия зависит не только от коэффициента звукопоглощения, но и от площади поверхности, которая этим коэффициентом обладает) будет равно:

$$A = \bar{\alpha}S, \quad (12)$$

где S, м^2 — общая площадь ограждающих поверхностей помещения. Естественно, что общее звукопоглощение помещения A, м^2 можно подсчитать, зная коэффициенты звукопоглощения α_i отдельных участков ограждающих поверхностей помещения S_i по формуле

$$A = \sum_1^n \alpha_i S_i, \quad (13)$$

где n — число учитываемых поверхностей. Откуда средний коэффициент звукопоглощения $\bar{\alpha}$ найдется с учетом формулы (12):

$$\bar{\alpha} = A/S = \sum_1^n \alpha_i S_i \Big/ S. \quad (14)$$

Пусть теперь в момент времени $t = 0$ в помещении начинает действовать источник звука с акустической мощностью W, Вт. За время τ, равное среднему вероятностному времени свободного пробега звуковой волны, источник звука отдает в помещение энергию равную $W\tau$, Дж. После первого отражения, т. е. к моменту времени 2τ от этой энергии остается доля $W\tau(1-\bar{\alpha})$, Дж. Но в интервале времени от τ до 2τ источник вновь отдает в помещение энергию, равную $W\tau$, Дж. Таким образом, к моменту времени $t = 2\tau$ в помещении будет существовать энергия: $W\tau + W\tau(1 - \bar{\alpha}) = W\tau[1 + (1 - \bar{\alpha})]$, Дж. Рассуждая таким же образом дальше, получим, что к моменту времени $t = 3\tau$, звуковая энергия в помещении

будет равна: $E = W\tau + W\tau[1 + (1 - \bar{\alpha})](1 - \bar{\alpha}) = W\tau[1 + (1 - \bar{\alpha}) + (1 - \bar{\alpha})^2]$, Дж и т. д. К моменту времени $t = n\tau$ (n — число отражений) запас энергии в помещении будет:

$$E = W\tau[1 + (1 - \bar{\alpha}) + (1 - \bar{\alpha})^2 + ... + (1 - \bar{\alpha})^{n-1}] = W\tau(1 - (1 - \bar{\alpha})^n / (1 - (1 - \bar{\alpha}) = W\tau/\bar{\alpha}[1 - (1 - \bar{\alpha})^n. \quad (15)$$

Исходя из свойств логарифмов имеем:

$$(1 - \bar{\alpha})^n = e^{n\ln(1-\bar{\alpha})}. \quad (16)$$

Тогда вместо (15) можно записать:

$$E = W\tau/\bar{\alpha}\left[1 - e^{n\ln(1-\bar{\alpha})}\right]. \quad (17)$$

Или, так как $n = t/\tau$ и с учетом формул (10) и (12):

$$E(t) = 4W \cdot V \Big/ cA\left[1 - e^{\frac{cS\ln(1-\bar{\alpha})t}{4V}}\right] \quad (18)$$

А для изменения (нарастания) средней плотности звуковой энергии $\varepsilon(t)$, Дж:

$$\varepsilon(t) = E(t)/V = 4W \Big/ cA\left[1 - e^{\frac{cS\ln(1-\bar{\alpha})t}{4V}}\right]. \quad (19)$$

Так как $\bar{\alpha} < 1$, то $\ln(1 - \bar{\alpha}) < 0$ и, следовательно, показатель экспоненты отрицателен, откуда в пределе при $t \to \infty$ второй член в квадратных скобках равен нулю. Поэтому для плотности звуковой энергии ε_0, Дж/м^3 в любой точке реверберационного поля при стационарном режиме и, учитывая, что $\bar{\alpha} \ll 1$, получим:

$$\varepsilon_0 = 4W/cA. \quad (20)$$

В этом случае наступает равновесное состояние и потери звуковой энергии при отражении звука ограждающими поверхностями помещения компенсируются энергией, доставляемой источником звука.

Поскольку интенсивность звука I, Вт/м^2 связана с плотностью звуковой энергии соотношением:

$$I = \varepsilon_0 c, \quad (21)$$

интенсивность в реверберационном поле "гулкого" помещения будет равна:

$$I = 4W/A. \quad (22)$$

Переходя к логарифмическим величинам (уровню интенсивности L_I, дБ и уровню звуковой мощности L_W, дБ) при опорных значениях интенсивности — $I_0 = 10^{-12}$, Вт/м^2; общего звукопоглощения — $A_0 = 1$, м^2 и звуковой мощности — $W_0 = 10^{-12}$, Вт, для уровня интенсивности получим:

$$L_I = L_W - 10\lg A/A_0 + 6. \quad (23)$$

Или, принимая во внимание, что уровень интенсивности с точностью до атмосферных условий равен уровню звукового давления: $L_I \approx L_P$, дБ и опуская значение $A_0 = 1$, м^2, которое не влияет на вычисления, для уровня звуковой мощности L_W, дБ получим следующее простое выражение:

$$L_W \approx L_P + 10\lg A - 6. \quad (24)$$

Из следует, что измеряя уровень звукового давления L_P в характерной точке реверберационного поля "гулкого" помещения, мы измеряем с точностью до постоянных значений наиболее объективную характеристику шума источника — его звуковую мощность (уровень его звуковой мощности), поскольку корректирующая величина A, м^2 является постоянной характеристикой данного помещения. Она зависит практически только от частоты, на которой проводятся измерения и определяется, как правило, заранее, являясь акустической характеристикой "гулкого" помещения, рассчитанной по формуле (13) или по формуле Сэбина, полученной им экспериментально:

$$A = 0{,}161V/T. \quad (25)$$

Здесь V, м^3 — по-прежнему объем помещения; T, с — стандартное время реверберации, то есть — время, в течение которого звуковой сигнал в помещении на данной частоте f, Гц затухает на 60 дБ.

Для корректированного уровня звуковой мощности $L_{W,\,A}$, дБА будет справедливой формула, аналогичная формуле (24):

$$L_{W,\,A} \approx L_{P,\,A} + 10\lg A - 6. \quad (26)$$

Здесь $L_{P,\,A}$, дБА — уровень звука, измеренный в характерной точке реверберационного поля с учетом кривой коррекции "A" шумомера, имитирующей субъективное восприятие звука человеком.

Таким образом, использование формул (24) и (26), справедливых для отраженных реверберационных полей "гулких" помещений, позволяет быстро судить об эффективности разрабатыва-

емых конструктивных средств снижения шума, устанавливаемых на источник, поскольку измерение даже в одной точке поля всего одного из двух параметров (L_P или $L_{P,\ A}$) является по сути измерением с точностью до постоянного объективного параметра — соответствующего уровня звуковой мощности. Поэтому, если получен эффект снижения шума в этой точке для какого-либо устройства, он будет объективно устойчив и при других условиях эксплуатации (например, при эксплуатации в открытом пространстве). Измерение звуковой мощности любым другим способом будет и более затратным, и существенно (например, для случая заглушенной измерительной камеры) более трудоемким.

Следует также отметить, что весьма важная формула (25) может быть получена теоретически на основании той же рассмотренной выше вероятностной модели реверберационного отраженного поля "гулкого" помещения.

Пусть, в момент времени $t = 0$ источник был выключен, а плотность звуковой энергии в отраженном поле гулкого помещения имеет величину ε_0, Дж/м^3, определяемую формулой (20). Тогда через время τ, плотность энергии в помещении будет равна: $\varepsilon_0(1 - \bar{\alpha})$, к моменту $t = 2\tau - \varepsilon_0(1 - \bar{\alpha})^2$, и, наконец, к моменту $t = n\tau$ (после — n-го отражения):

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 (1 - \bar{\alpha})^n = \varepsilon_0 (1 - \bar{\alpha})^{t/\tau}. \qquad (27а)$$

Или, так как $(1 - \bar{\alpha})^n = e^{n \ln(1-\bar{\alpha})}$;

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 e^{t/\tau \ln(1-\bar{\alpha})} = \varepsilon_0 e^{cSt/4V \ln(1-\bar{\alpha})}. \qquad (27б)$$

То есть плотность звуковой энергии будет убывать по экспоненте, так как $\ln(1 - \bar{\alpha}) < 0$. Логарифмируя (27б) получим:

$$\ln \varepsilon(t) = \ln \varepsilon_0 + cS/4Vt \ln(1 - \bar{\alpha}) \lg e \quad \text{или}$$

$$\ln \varepsilon_0/\varepsilon(t) = -cS/4V^{t \ln(1-\bar{\alpha})}.$$

Перейдем к десятичным логарифмам, тогда:

$$10 \lg \varepsilon_0/\varepsilon(t) = -10cS/4V^{t \ln(1-\bar{\alpha}) \lg e}. \qquad (28а)$$

Если ослабление энергии равно 60 дБ, то время $t = T$ (стандартному времени реверберации). Откуда:

$$60 = -10cS/4V^{T \ln(1-\bar{\alpha}) \lg e}. \qquad (28б)$$

Эту формулу можно привести к еще более простому виду. С этой целью разложим функцию $\ln(1 - \bar{\alpha})$ в ряд Тейлора. Формула ряда Тейлора:

$$f(\alpha) = f(0) + f'(0)/1!\alpha + f''(0)/2!\alpha^2 + \ldots$$

Поскольку в данном случае:

$$f(\alpha) = \ln(1 - \bar{\alpha}); \;\; f'(\alpha) = -1/1 - \bar{\alpha};$$
$$f''(\bar{\alpha}) = -1/(1 - \bar{\alpha})^2.$$

Соответственно:

$$f(0) = \ln(1 - 0) = 0; \;\; f'(0) = -1; \;\; f''(0) = -1$$

и таким образом:

$$f(\bar{\alpha}) = \ln(1 - \bar{\alpha}) \approx 0 - 1/1\bar{\alpha} - \bar{\alpha}/2 - \ldots$$

Учитывая лишь первый значащий член, так как $\bar{\alpha} < 1$ будем иметь: $\ln(1 - \bar{\alpha}) \approx \bar{\alpha}$ и тогда формула (28б) преобразуется к виду:

$$T \approx 0{,}161V/S\bar{\alpha} \approx 0{,}161V/A. \qquad (29)$$

То есть эта формула соответствует приведенной выше и использованной нами в экспериментальной формуле Сэбина (25).

Из практики совершенствования шумовых и эксплуатационных характеристик оборудования в "гулких" производственных помещениях

На рис. 1 представлен один из типовых стендов, предназначенных для измерения параметров быстроходных ДВС, с комплектом дополнительного оборудования, позволявшего проводить одновременно также и работы по снижению шума различных источников, сопровождающих работу двигателя. Объемная зона отраженного поля, в которой проводились акустические измерения (она на рис. 1 обозначена условной штрихпунктирной линией), находилась над двигателем (на рис. 1 двигатель закрыт звукоизолирующим кожухом высокой эффективности (см. позицию *3*). С помощью этого продуваемого кожуха (продуваемого, так как исследовался двигатель с воздушным охлаждением) из общего шума двигателя исключался структурный шум самого двигателя. Соответственно, в случае необходимости, шум впуска и шум выпуска исключались с помощью высокоэффективных абсорбционных стендовых глушителей (на рис. 1 — позиции *4* и *5*). Чтобы исключить влияние на результаты акустических измерений шума обдувочного вентилятора, на входе и выходе последнего также устанавливались высокоэффективные абсорбционные глушители

(позиция *1*). Поскольку при отводе выхлопных газов, проходящих через стендовый глушитель шума выпуска, в нем могут образовываться застойные зоны, последний (см. позицию *5*) соединялся в своей верхней части гибким шлангом небольшого диаметра с приточным воздуховодом приточно-вытяжной вентиляции стенда. Отвод выхлопных газов из абсорбционного стендового глушителя выпуска осуществлялся через отверстие в его нижней части, соединенного с вытяжным воздуховодом трубой отвода *9*.

Некоторые акустические параметры для двух "гулких" стендов разного объема приведены в табл. 1. (Стенд № 1 — V_1 = 80, м^3; стенд № 2 — V_2 = 64, м^3).

Для усиления "гулкости" стенды были облицованы звукоотражающей плиткой и снабжены (также для улучшения качества отраженного поля) звукоотражающими рассеивающими звук щитами. Щиты закреплялись по углам стендов с поворотом отражающих поверхностей относительно друг друга на угол 3...15°.

Одним из важных этапов, предваряющих проведение акустических исследований шума, излучаемого различными источниками объекта, является предварительное определение пространственных границ отраженного поля в данном гулком помещении и частотного диапазона, в котором возможны соответствующие качественные акустические измерения.

Пространственные границы отраженного поля зависят прежде всего от величины общего звукопоглощения A, м^2 и размеров помещения. Чтобы при измерениях избежать погрешностей, связанных с влиянием прямого звука, граница зоны измерения, непосредственно прилегающая к источнику звука, должна находиться от него по крайней мере на расстоянии $l \geqslant \sqrt{A/5}$. К сожалению, при больших значениях A это расстояние будет увеличиваться, а пространственная зона отраженного поля, пригодная для измерений, уменьшаться. Ориентировочными могут служить значения параметра A, приведенные в табл. 1. Для уменьшения этого параметра ограждающие поверхности помещения (как уже отмечалось выше) следует покрыть материалом, хорошо отражающим звук. Кроме того, на границы зоны отраженного поля может оказывать влияние интерференция звуковых волн вблизи стен и углов помещения. Желательно, чтобы эти границы находились на расстояниях $l_1 \geqslant 0{,}25\lambda$ и $l_2 \geqslant 0{,}7\lambda$ от его стен и углов соответственно (см. рис. 1). Здесь λ — максимальная длина волны, на которой проводятся измерения. Для приведенных в табл. 1 параметров стендовых помещений пространственные границы зоны отраженного поля оказались достаточными для размещения пяти-шести измерительных точек, находящихся примерно на расстоянии 0,8...1,0 м друг от друга, что позволяло в случае необходимости уточнять результаты измерений.

В свою очередь, границы частотного измерительного диапазона зависят от размеров и формы помещения. Определяющее влияние имеет объем помещения. Чем больше объем помещения, тем шире частотный диапазон, в котором возможно получить достоверные результаты. Ориентировочно нижняя граничная частота диапазона может быть определена по формуле

$$f_{ГР} = 1000/\sqrt[3]{V}, \text{ Гц.}$$

При этом конфигурация помещения должна обеспечивать условие: $l_{max} < \sqrt[3]{V}$, где l_{max} — наибольшее расстояние между ограждениями. В нашем случае частота $f_{ГР}$ = 250 Гц. При увеличении объема помещения удовлетворительные результаты можно получить и на более низких частотах. На высоких частотах (как отмечалось выше) качество отраженного звукового поля улучшалось установкой рассеивающих щитов *6* (см. рис. 1), имеющими площадь 0,8...1,5 м^2 и развернутых под небольшими углами друг относительно друга.

В табл. 1 приведены также результаты измерений неравномерности ΔL_P, дБ реверберационной зоны отраженного звукового поля при использовании широкополосного источника шума. Как видно из табл. 1, измерение этого параметра подтверждает возможность качественных акустических измерений в отраженном поле данных стендов, начиная с октавной полосы в 250 Гц. При этом стенд № 1 бóльшего объема, как и ожидалось, обладает несколько лучшими параметрами для оценки акустических характеристик исследуемых шумящих объектов. В нашем случае, поскольку проводились работы по снижению шума быстроходных ДВС, наибольший интерес представлял средне- и высокочастотный диапазон измерений, для которого, как видно из табл. 1, акустические характеристики двух дооборудованных стендов позволяли проводить соответствующие акустические измерения различных источников шума исследуемого двигателя. В табл. 2 приведены величины изменения параметров двигателя после установки стендовых абсорбционных глушителей, по отношению к двигателю с серийными глушителями впуска и выпуска.

Таблица 1

Акустические параметры двух "гулких" производственных стендов

Наименование помещения	Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Стенд №1								
T, с	0,84	1,47	1,47	1,44	1,38	1,32	1,17	0,83
A, м^2	15,4	8,8	8,8	8,95	9,3	9,75	11,0	15,5
$\bar{\alpha}$	0,138	0,079	0,079	0,08	0,083	0,08	0,075	0,061
$\pm\Delta L_P$	1,5	2,5	1,0	0,5	0,75	0,5	0,5	0,5
Стенд № 2								
T, с	0,71	1,25	1,25	1,15	1,1	1,03	0,96	0,68
A, м^2	14,4	8,4	8,4	8,9	9,2	10,0	10,7	15,2
$\bar{\alpha}$	0,164	0,095	0,095	0,101	0,104	0,114	0,122	0,173
$\pm\Delta L_P$	1,5	2,0	1,0	0,75	0,75	0,5	0,5	0,5

Здесь n, мин$^{-1}$ — частота вращения двигателя; ΔL_Σ, дБ — разность между суммарными уровнями звукового давления, измеренными в отраженном поле бокса до установки стендовых глушителей и после установки последних; ΔN, л.с. — соответствующая разность в эффективной мощности двигателя; N_N, л. с — номинальная мощность двигателя; Δg, г/л.с.·ч — разность в удельном расходе топлива; g_N, г/л.с.·ч — удельный расход топлива на номинальном режиме.

Поскольку шум впуска и выпуска при получении данных табл. 2 был практически исключен с помощью стендовых абсорбционных глушителей, нижняя граница при вычислении ΔL_Σ, дБ определялась конструктивным шумом "собственно двигателя". Это, в частности, объясняет уменьшение величины ΔL_Σ с ростом частоты вращения двигателя, так как при увеличении n, мин$^{-1}$ абсолютные уровни структурного шума двигателя возрастают. Из табл. 2 также следует, что стендовые абсорбционные глушители незначительно влияют на изменение мощности и экономичности двигателя.

Таблица 2

Оценка влияния установки стендовых глушителей на мощность и удельный расход двигателя

Показатели	Частота вращения вала двигателя n, мин$^{-1}$					
	3000	3500	4000	4500	5000	5500
ΔL_Σ	+15,0	+10,0	+10,0	+13,0	+11,0	+9,0
$\Delta N/N_N\cdot 100$ %	1,67	0,0	1,6	0,83	1,64	1,25
$\Delta g/g_N\cdot 100$ %	−1,4	0,0	3,3	1,67	1,1	−1,4

На рис. 4 в качестве примера показаны результаты одновременных измерений скоростных характеристик двигателя и уровней звука $L_{P,A}$, дБА, создаваемых шумом выпуска для трех значений площади выходного отверстия F, мм^2 акустической части глушителя выпуска. Прочие источники шума двигателя были исключены с помощью описанных выше стендовых шумоглушащих конструкций. На рис. 4 кривые: *1* — соответствуют площади F = 20 мм^2; кривые *2* — F = 75 мм^2 и кривые *3* — F = 450 мм^2.

Соответственно, гидравлическое сопротивление глушителя в первом случае будет существенно выше гидравлического сопротивления третьего случая.

При этом соответственно и шум, излучаемый системой выпуска двигателя, в первом случае будет существенно (на 10...12 дБА) ниже шума третьего варианта. Однако мощность двигателя N, л.с. в функции от числа оборотов двигателя n, мин$^{-1}$ (см. верхнюю часть рис. 4) изменяется при этом незначительно.

Таким образом, только путем изменения одного параметра глушителя (выходного отвер-

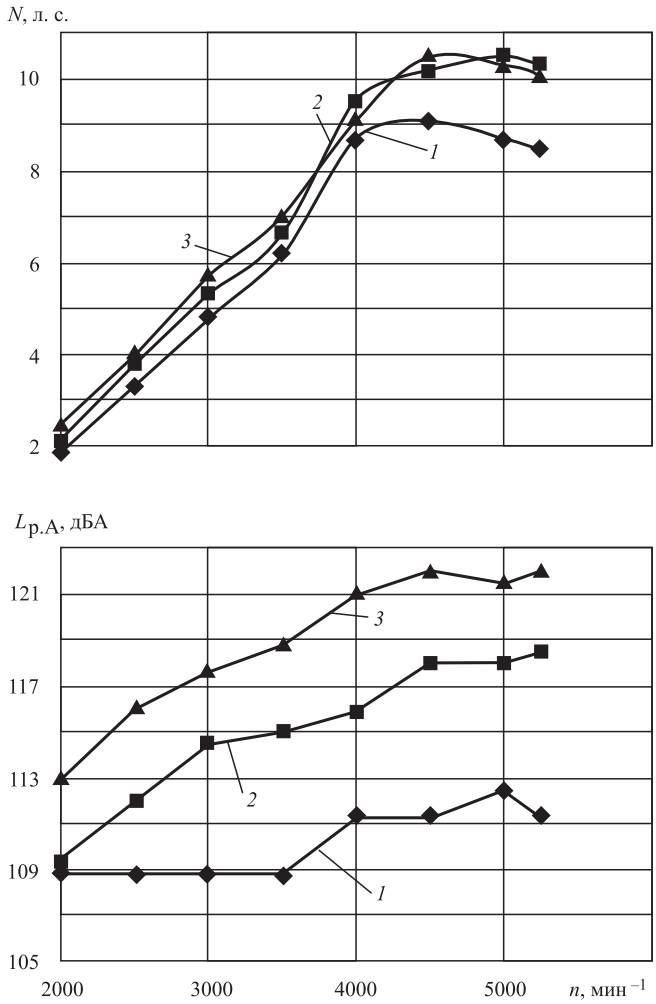

Рис. 4. Скоростные характеристики двухтактного ДВС и уровни звука шума выпуска в зависимости от площади выходного отверстия глушителя

стия — F, мм^2) возможно существенное снижение общего шума двигателя без существенного снижения его мощности. При этом уровень звука $L_{P,\,A}$, дБА, измеренный в отраженном поле "гулкого" бокса имеет смысл (с точностью до постоянных) корректированного уровня звуковой мощности исследуемого источника шума. Поэтому обнаруженный эффект, дающий соответствующее снижение шума в характерной точке отраженного поля, будет устойчиво проявляться и при других акустических условиях эксплуатации (например, в открытом пространстве).

Заключение

Таким образом, описанные "гулкие" стенды позволяют получать объективные как спектральные, так и интегральные шумовые характеристики исследуемых источников и использовать их в дальнейшем для проведения конкретных работ по снижению шума двигателя. При этом затраты на изготовление дополнительных конструктивных элементов по переоборудованию стендов оказываются существенно меньше затрат, необходимых для строительства специальных измерительных камер. Дополнительным достоинством описанного выше подхода является возможность одновременного определения акустических, мощностных и экономических параметров двигателя, что открывает дополнительные возможности по его совершенствованию по всему комплексу заявленных параметров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Справочник проектировщика:** Защита от шума / ред. Е. Я. Юдин. — М.: Стройиздат, 1974. — 136 с.
2. **Строкин А. А.** К вопросу о выборе метода измерения шумовых характеристик при проведении НИОКР по разработке малошумного оборудования в производственных условиях // Грузовик. — № 3. — 2015. — С. 41—47.
3. **Строкин А. А.** Факторы учета характеристик направленности шума при разработке машин // Технологии техносферной безопасности. 2017. — Вып. 3 (73). — 7 с. — https: // academygps.ru / ttb.

Художественный редактор *Д. С. Рыбакова*. Технический редактор *Е. М. Патрушева*. Корректор *Е. В. Комиссарова*
Сдано в набор 06.07.2019. Подписано в печать 16.09.2019. Формат 60 × 88 1/8. Усл. печ. л. 5,88.
Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.
Оригинал-макет: ООО "Адвансед солюшнз". 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: **www.aov.ru**