

ISSN 2029-9303



KAUNO TECHNIKOS KOLEGIJA
KAUNAS UNIVERSITY OF APPLIED ENGINEERING SCIENCES

**INŽINERINĖS IR EDUKACINĖS
TECHNOLOGIJOS**

Mokslinių straipsnių žurnalas

**ENGINEERING AND EDUCATIONAL
TECHNOLOGIES**

Scientific journal

Kaunas, 2020

<p>Vyriausioji redaktorė Doc. Dr. Marija Jotautienė <i>Kauno technikos kolegija/ Kaunas University Of Applied Engineering Sciences (LT)</i></p>	<p>Socialiniai mokslai/ Social Sciences</p>
<p>Vykdančioji redaktorė Doc. Dr. Giedrė Adomavičienė <i>Kauno technikos kolegija/ Kaunas University Of Applied Engineering Sciences (LT)</i></p>	<p>Socialiniai mokslai/ Social Sciences</p>
<p>Mokslinė sekretorė Doc. Dr. Esmeralda Štjyps <i>Kauno technikos kolegija/ Kaunas University Of Applied Engineering Sciences (LT)</i></p>	<p>Technologijos mokslai/ Technological Sciences</p>
<p>Redaktorių kolegija/Editorial Board:</p>	
<p>Prof. Habil. Dr. Algirdas Vaclovas Valiulis <i>Vilniaus Gedimino technikos universitetas/Vilnius Gediminas Technical University (LT)</i></p>	<p>Technologijos mokslai/ Technological Sciences</p>
<p>Prof. Dr. Elmar Heinemann <i>Šmalkaldeno taikomųjų mokslų universitetas/University Of Applied Sciences Schmalkalden (DE)</i></p>	<p>Technologijos mokslai/ Technological Sciences</p>
<p>Prof. Habil. Dr. Gál József <i>Šegedo universitetas/ University of Szeged, Hungary (HUN)</i></p>	<p>Technologijos mokslai/ Technological Sciences</p>
<p>Mgr. Dominika Trębacz <i>Automobilių pramonės institutas, mokslinio žurnalo „The Archives of Automotive Engineering“ vykdančioji redaktorė/Automobile Industry Institute, Executive editor of scientific journal „The Archives of Automotive Engineering (POL)</i></p>	<p>Technologijos mokslai/ Technological Sciences</p>
<p>Doc. Dr. Ernestas Ivanauskas <i>Kauno technologijos universitetas/ Kaunas University Of Technology (LT)</i></p>	<p>Technologijos mokslai/ Technological Sciences</p>
<p>Doc. Dr. Gediminas Pupinis <i>Vytauto Didžiojo universitetas Žemės ūkio akademija / Vytautas Magnus University Agriculture Academy (LT)</i></p>	<p>Technologijos mokslai/ Technological Sciences</p>
<p>Doc. Dr. Marius Saunoris <i>Kauno technologijos universitetas/ Kaunas University Of Technology (LT)</i></p>	<p>Technologijos mokslai/ Technological Sciences</p>
<p>Doc. Dr. Šarūnas Kilius <i>Kauno technikos kolegija/ Kaunas University Of Applied Engineering Sciences (LT)</i></p>	<p>Technologijos mokslai/ Technological Sciences</p>
<p>Doc. Dr. Vytenis Naginevičius <i>Kauno technikos kolegija/ Kaunas University Of Applied Engineering Sciences (LT)</i></p>	<p>Technologijos mokslai/ Technological Sciences</p>

Dr. Kastytis Laurinaitis <i>Vytauto Didžiojo universitetas Žemės ūkio akademija / Vytautas Magnus University Agriculture Academy (LT)</i>	Technologijos mokslai/ Technological Sciences
Dr. Rolandas Samajauskas <i>IĮ „Pastatų sertifikavimo biuras“/ IE „Building Certification Office“ (LT)</i>	Technologijos mokslai/ Technological Sciences
Dr. Rosita Norvaišienė <i>Kauno technikos kolegija/ Kaunas University of Applied Engineering Sciences (LT)</i>	Technologijos mokslai/ Technological Sciences
Prof. Dr. Genutė Gedvilienė <i>Vytauto Didžiojo universitetas/ Vytautas Magnus University (LT)</i>	Socialiniai mokslai/ Social Sciences
Prof. Habil. Dr. Vilija Targamadžė <i>Vilniaus universitetas/Vilnius University (LT)</i>	Socialiniai mokslai/ Social Sciences
Doc. Dr. Vita Krivickienė <i>Kauno technikos kolegija/ Kaunas University Of Applied Engineering Sciences (LT)</i>	Socialiniai mokslai/ Social Sciences
Doc. Dr. Daiva Lepaitė <i>Vilniaus universitetas/Vilnius University (LT)</i>	Socialiniai mokslai/ Social Sciences
Dr. Lina Girdauskienė <i>Kauno technologijos universitetas/Kaunas University Of Technology (LT)</i>	Socialiniai mokslai/ Social Sciences

Leidiny s įrašytas į **LMT patvirtintų leidinių sąrašą**
<http://www.mab.lt/lt/istekliai-internete/mokslo-zurnalai/269>

Ir įtrauktas į **Index Copernicus Journals Master List**
<http://journals.indexcopernicus.com/inznerina+ir+educacinos+technologijos.p12156.3.html>

Redakcijos adresas:

VšĮ Kauno technikos kolegija
 Tvirtovės al. 35, LT- 50155 Kaunas
 Tel./faks. (8 37 308620)/(8 37 333120)
 El. p. ktk@ktk.lt
<http://www.ktk.lt>

Address:

Kaunas University of Applied Engineering Sciences
 Tvirtovės av. 35, LT- 50155 Kaunas
 Phone./fax. (+370 37 308620)/(+370 37 333120)
 E-mail. ktk@ktk.lt
<http://www.ktk.lt>

Visos leidinio leidybos teisės saugomos. Šis leidinys arba kuri nors jo dalis negali būti dauginami, taisomi ar kitaip platinami be leidėjo sutikimo.

All rights of the publication are reserved. No reproduction, copy or transmission of this publication may be made without publisher's permission.

© Kauno technikos kolegija, 2020
ISSN 2029-9303

REDAKTORIAUS ŽODIS

Gerbiamiems skaitytojams pristatome mokslinio žurnalo „Inžinerinės ir edukacinės technologijos“ 2020 metų antrąjį numerį.

Straipsnius parengė įvairių Lietuvos kolegijų bei universitetų mokslininkai, tyrėjai ar jų grupės. Džiugu, kad tyrėjų grupėse dalyvauja ir socialiniai partneriai, nes tik kuriant bendradarbiavimo tinklus galima kur kas efektyviau spręsti inžinerines bei edukacines problemas, išvelgti naujas problemų sprendimo būdų galimybes.

Žurnale publikuojami statybos, elektros, mechanikos, transporto inžinerijos kryptių tyrimų rezultatai.

Taigi šis mokslinis žurnalas yra puiki galimybė dėstytojams, studentams, tyrėjams viešinti savo atliktų mokslinių taikomųjų tyrimų rezultatus, rasti bendradarbiavimo taškų su kitomis tyrėjų grupėmis.

Visais skaitytojams ir būsimiems autoriams rūpimais klausimais siūlome kreiptis į redkolegiją.

Su pagarba,

Vyriausioji redaktorė



socialinių mokslų dr. Marija Jotautienė

TURINYS

ANALYSIS OF METHODS FOR CALCULATING FIRE RESISTANCE OF WOODEN STRUCTURES.....	8
Jūratė Mockienė, Loreta Inokaitytė Kaunas University of Applied Engineering Sciences	
BETONO SU SMULKIOS FRAKCIJOS KANAPIŲ SPALIŲ UŽPILDAIS.....	17
TYRIMAI.....	17
Vincas Gurskis ^{1,2} , Dainius Ramukevičius ^{1,2} , Tomas Rakauskas ¹ ¹ Vytauto Didžiojo universitetas, ² Kauno technikos kolegija	
SLĖGINIO UŽDEGIMO VARIKLIO EKOLOGINIŲ RODIKLIŲ TYRIMAS KEIČIANT IŠIURBIAMO ORO AUŠINIMO INTENSYVUMĄ.....	25
Audrius Matulis ¹ , Alfredas Rimkus ^{1,2} ¹ Vilniaus technologijų ir dizaino kolegija, ² Vilniaus Gedimino technikos universitetas	
DYZELINIŲ IR BENZININIŲ AUTOMOBILIŲ DEGALŲ SAŪNAUDŲ IR CO ₂ EMISIJOS LYGINAMASIS TYRIMAS.....	33
Alfredas Rimkus Vilniaus Gedimino technikos universitetas	
VARIKLIO ALYVOS KOKYBĖS POKYČIŲ TYRIMAS	40
Dalius Kalisinskas Kauno technikos kolegija	
KROVINIO PRIEKABOJE PADĖTIES ĮTAKOS SAŪSTATO STABILUMUI TYRIMAS	45
Kastytis Laurinaitis, Tatjana Sokolova Kauno technikos kolegija	
MAŽIAUSIO DETALIŲ, EFEKTYVIAI APDIRBAMŲ CNC TEKINIMO STAKLĖMIS, SKAIČIAUS PARTIJOJE NUSTATYMAS.....	51
Laimutis Stankevičius, Vadim Mokšin Vilniaus Gedimino technikos universitetas	
SIJOS DEVIACIJŲ NUSTATYMAS TAIKANT ĮVAIRIUS METODUS	58
Jurijus Tretjakovas ^{1,2} , Audrius Čereška ^{1,2} ¹ Vilniaus Gedimino technikos universitetas, ² Vilniaus technologijų ir dizaino kolegija	
GARSO ŠALTINIO LOKALIZAVIMO TIKSLUMĄ ĮTAKOJANČIŲ VEIKSNIŲ TYRIMAS	67
Saulius Sakavičius Vilniaus Gedimino technikos universitetas	

ANALYSIS OF METHODS FOR CALCULATING FIRE RESISTANCE OF WOODEN STRUCTURES

Jūratė Mockienė, Loreta Inokaitytė
Kaunas University of Applied Engineering Sciences

Abstract

One of the essential requirements of a building is fire safety, which states that in case of a fire, building supporting structures must withstand loads for a certain period of time and restrict the spread of fire and smoke in the building.

Wood constructions are widely used in building, thus issues of their fire resistance are crucial.

The analysis of methods for calculating fire resistance of wooden elements is performed in the article. Examples of elements' design for fire safety, result analysis and comparison of calculation methods are presented as well as suggestions for increasing of fire resistance of wooden structures are provided.

Key words: wood constructions, combustibility, charring rate, design.

Introduction

Until the beginning of the 14th century wood was probably the only building material used in Europe for roofs, bridges and residential buildings. Over time, due to frequent and devastating fires, less wood has been employed in urban construction. The widespread exploitation of wood in modern construction is mainly due to good physical and mechanical properties of wood allowing it to be a versatile material for construction and finishing purposes. However, wood as a building material has a significant disadvantage, i.e. flammability.

For combustion to start, it is necessary that wood surface is heated to a certain temperature and wood is surrounded by atmospheric air. The process of wood decomposition depends on the period of exposure to the elevated temperature, the properties of wood and other factors.

At a temperature of 100-105°C, only the process of moisture evaporation from wood takes place. When the temperature reaches 150-275°C, the emission of gaseous products becomes more active, and resin vapours start to emit. The emitted gas starts to ignite under the temperature of 225-235°C. At 260°C, the emitted gas burns in a constant continuous flame. Wood becomes brown. Wood decomposition begins under the temperature of 275-290°C and continues due to the effects of an external heat source. When heat is released, a lot of flammable vapours and gases are emitted, wood burns well even when the external heat source is removed. Wood itself becomes the source of combustion. Spontaneous ignition of wood occurs at 250-400°C.

Reducing flammability of wooden structures is a prerequisite for the construction of residential, public and outbuildings.

Currently, European countries have a common system of European standards defining the requirements for building materials against the effects of fire. In the past, products were tested and classified in accordance with the standards of each country, which prevented the easy export of building materials to the countries of European Union.

Building materials are divided into seven classes according to their flammability. In the case of wood, its flammability class can be raised from class D to C or B using flame retardants for wood protection. Flame retardants are distributed into three groups: a) surface coating, b) wood impregnation, c) wood impregnation by the method of deep impregnation.

Factors impacting wood product flammability during tests and in real fires are wood density and the thickness of an element. The lower the wood density, the higher the thermal conductivity, so the faster the wood surface heats up to the ignition temperature. The effect of the thickness of an element is related to the burning of wood products, which increases the damaged area and allows the fire to spread through the cavity.

The article (Mikkola, 2004) describes SBI test, which focused on the thickness of a wooden element (9 mm thick plywood was employed). Heat release increased significantly when the sample burned through and ignited on both sides. This means that the product belongs to a lower class than D and that it is not treated with flame retardants. Obviously, a thinner sample would have reached the critical temperature in a shorter time.

Wood charring, which reduces the cross-section of wooden elements, is usually a major factor in the mechanical strength of wooden elements. The article (Konig et al, 2001) reviews the main topics of the Eurocode and the amendments made during the editing of the EC 5 predecessor ENV 1995-1-2. Compared to ENV 1995-1-2, the attitudes related to charring have been specified significantly. The value of charring rate β_0 was introduced as a one-dimensional heat transfer condition according to the standard fire exposure for a semi-infinite wood panel. Researchers emphasize the need to focus on the rounded corners of the charred

cross-section. To facilitate calculations of cross-sectional characteristics, a value β_n is derived that evaluates the rounding of the corners.

Hietaniemi et al (2004) present a study of the behavior of load-bearing beams during a natural fire (in a grocery store). The mechanical functioning of beams in the fire is assessed on the basis of material charring under the influence of natural fire. Probabilistic fire analysis shows that depending on the initial growth of fire and the time of a year (amount of snow load), the beams withstand at least 75-120 minutes under the conditions of natural fire. The article recommends improving the fire safety of the building, investing more in the installation of fire detection and emergency systems, rather than increasing the fire resistance of load-bearing structures.

The article (Siauciunas et al, 2009) reviews the peculiarities of the behaviour of wooden centrally compressible elements under fire conditions and presents a comparison of research and calculation results. Wooden load-bearing constructions are generally considered to be much more dangerous in terms of fire compared to steel or reinforced concrete structures. However, due to the low thermal conductivity, wooden structures lose their load-bearing capacity much slower during fire. Wood burns at a constant rate which depends on the cross-sectional shape and dimensions of the element. The more massive the cross section of the element, the relatively smaller the reduction in cross-sectional area and the smaller the effect of the decrease in wood strength properties and modulus of elasticity with increasing temperature.

The article (Bednarek et al, 2007) presents the results of the analysis of wood strength impregnated with a salt-containing substance and their analysis. The aim of the test was to determine the effect of the deep impregnation method on the strength of wood under normal conditions, and the effect of impregnation under high temperatures. It is concluded that impregnation with salt-containing materials using a deep impregnation method has a significant effect on the strength parameters of wood.

In this work, the analysis of methods for calculating fire resistance of wooden elements is performed and examples of fire resistance calculations for bending and compressible elements are presented in order to find out the accuracy of the methods.

Research methodology

The design in accordance with EN 1995-1-2 consists of two steps: firstly, charring depth is calculated, and secondly, residual cross-sectional strength is determined. Charring depth is the distance between the outer surface of an original element and charring boundary. It must be calculated on the basis of the duration of fire exposure and the corresponding charring rate. The rules for calculating charring depth apply to standard fire exposure conditions. It is rational to associate this fire model with the subsequent ignition after the fire has fully expanded in a building. In other words, the standard fire model does not reflect the actual temperature and loads that can occur in a natural fire.

Calculation methods for standard fire-affected wooden structural elements to verify the load-bearing capacity function depend on the type of a structure itself (linear elements; wall and overlay structures) and whether or not the construction is protected.

Unprotected surfaces throughout fire exposure

1. One-dimensional charring rate. Calculated charring depth:

$$d_{char,0} = \beta_0 \cdot t; \quad (1)$$

Here: $d_{char,0}$ - calculated one-dimensional charcoal depth; β_0 - calculated one-dimensional charring rate under standard fire conditions; t – duration of fire exposure, min.

2. The relative rate of charring, the magnitude of which covers the effect of corner roundnesses and cracks in the corners. Relative charring depth:

$$d_{char,n} = \beta_n \cdot t; \quad (2)$$

Here: $d_{char,n}$ - the relative charring depth in application of which the effect of corner roundness is taken into consideration; β_n - the relative rate of charring, the magnitude of which covers the effects of roundnesses and cracks;

Applying a one-dimensional calculated charring rate, the radius of roundness of the angles of the calculated cross-sections must be equal to the charring depth $d_{char,0}$.

Wood density is affected by wood porosity, moisture, wood type, width of annual rings, age, growth conditions. The density of the same type of wood can vary by 10-20%. For many species, the densest wood is at the bottom of the trunk, rising to the top the density decreases.

The surfaces of beams and columns that are protected form the effects of fire from the very beginning

Examining surfaces of linear elements (beams and columns) protected against fire with cladding, other protective materials or other structural elements, it must be focused on [6]:

- the start of charring is delayed to a point in time t_{ch} .
- charring may begin before the breakdown of fire protection equipment but at a slower rate and continue until the moment t_f of the breakdown of fire protection equipment.
- from the moment t_f of failure of fire protection means to the time t_a described below, the rate of charring exceeds [6] the specified values.
- at the time t_a when charring depth is equal to the charring depth of the same but unprotected fire element or with 25 mm (whichever is the smaller value), charring rate corresponds to the values given in [6].

The start moment t_{ch} of element charring, time period to the start moment t_f of decomposition of fire protection equipment and charring rate till protection decomposition (when $t_f > t_{ch}$) are determined on the basis of tests or calculated according to formulas depending on the type of cladding.

Fire protection cladding may decompose due to:

- Charring or mechanical deterioration of the coating material.
- Insufficient depth of penetration of flanges into unburned wood.
- Improper arrangement of flanges and distance between them.

The magnitude of the charring rate, as well as the time before the start of charring, should depend on the temperature affecting the wooden element. As EN 1995-1-2 methodology is based on a standard fire model, so the temperature has no impact here. It is considered to be constant and of such magnitude that wood burns by itself throughout the entire duration of the exposure.

Methodology for calculating bearing capacity

After calculating charring of the linear element, further calculations according to EN 1995-1-2 can be made using two alternative methods to determine cross-sectional performance of beams and columns [6]:

1. Method of reduced cross-section;
2. Method of deteriorated properties.

Method of reduced cross-section

The essence of this method is that $k_{mod,fi} = 1$. This means that the calculated values of wood strength and stiffness are taken under the conditions of normal temperature.

Using this method for calculation, fire resistance time of the elements depends on the bearing capacity of the remaining unburned cross-section, i. e. the cross-section is reduced by subtracting the relative depth of charring and the product of the coefficients k_0, d_0 . When the fire action time is $t \geq 20$ min, the coefficient $k_0 = 1, 0$. The coefficient d_0 is the thickness of a layer whose strength and stiffness are considered to be zero; always accepted equal to 7 mm. Thus, the cross-section of the element is always reduced by additional 7 mm at a fire exposure time of more than 20 minutes and is calculated from the efficient cross-section. Efficient cross-section is the cross-section determined applying the method of reduced cross-section referring to calculating construction behaviour during fire. It is obtained by subtracting the parts from the residual cross-section, which have lost their strength and stiffness.

The efficient cross-section must be calculated by reducing the initial cross-section by the effective charring depth d_{ef} :

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 d_0; \quad (3)$$

Here: $d_0 = 7\text{mm}$; $d_{char,n}$ - determined according to formula 2 (for exposed surfaces); k_0 - coefficient (for unprotected surfaces must be taken from [3]).

For protected surfaces when $t_{ch} > 20$ min, it must be assumed to be in the time interval from $t = 0$ till $t = t_{ch}$ the coefficient k_0 varies linearly from 0 to 1. For protected surfaces when $t_{ch} \leq 20$ min, the Table [6] is applied.

Method of deteriorated properties

As an alternative to the method of reduced cross-section, the method of deteriorated properties provides $k_{\text{mod},fi}$ values for calculation of element compression, tensile and bending strengths according to expression (4).

The calculated strength value to test load-bearing capacity is determined as follows:

$$f_{d,fi} = k_{\text{mod},fi} \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}}; \quad (4)$$

Here: $k_{\text{mod},fi}$ - coefficient of correction due to fire.

The essence of this method is that the possibility of residual cross-sectional load bearing capacity is calculated. Residual cross-section is a part of the cross-section of the original element which remains after deduction of the charred layer $d_{\text{char},n}$.

Due to almost linear relationships among temperature, properties of strength and stiffness, equations are derived where reduction coefficient can be calculated depending on the perimeter p of the cross-section affected by the fire and the area A_r of residual cross-section.

The rules of this method apply to rectangular cross-sections of coniferous wood which are exposed to fire from three or four sides and to round sections which are exposed to fire along the entire perimeter.

When $t \geq 20$ min, correction coefficient $k_{\text{mod},fi}$ is calculated as follows:

- bending power:

$$k_{\text{mod},fi} = 1,0 - \frac{1}{200} \frac{p}{A_r}; \quad (5)$$

- compressive power:

$$k_{\text{mod},fi} = 1,0 - \frac{1}{125} \frac{p}{A_r}; \quad (6)$$

- tensile power and modulus of elasticity:

$$k_{\text{mod},fi} = 1,0 - \frac{1}{330} \frac{p}{A_r}; \quad (7)$$

Here: p – the perimeter of the residual element exposed to the fire, m; A_r - residual cross-sectional area, m².

Correction coefficient $k_{\text{mod},fi}$ of unprotected and protected elements due to fire at the time $t = 0$ is equal to $k_{\text{mod},fi} = 1,0$. The correction coefficient for unprotected elements can be determined by linear interpolation at a time $0 \leq t \leq 20$ min.

Research results and discussion

The detailed analysis procedure for calculating the behaviour of structures in a fire has to assess the behaviour of the structure system at elevated temperatures, the potential effects of heat and beneficial impacts of active and passive fire protection systems, as well as uncertainties related to these aspects and the importance of the structure.

Buildings must be divided into fire compartments in order to restrict the spread of fire and its hazardous factors, to ensure the safe exit of people from a building affected by fire, to facilitate rescue and firefighting operations and to reduce fire damage. The fire load is determined in accordance with the standards of LST EN 1991-1-2 series, after estimating and calculating the amount of heat that can be released when all premises or groups of premises have burnt, which are separated from other parts of the building by walls and overlays of fixed fire resistance materials due to which the spread of fire is impossible during a certain period of time (as well as structural elements of the building and their decoration).

Fire resistance of load-bearing structures of a building is calculated according to three levels of complexity: the element (e.g. load-bearing walls, frames, columns, beams, girders, trusses, arches, stiffening diaphragms, overlays, etc.), the construction (more than one element forms a construction), and the structure (an entire construction of a building). The results of more complex calculations apply to structures of lower complexity: if fire resistance calculations of the construction of a structure or the entire structure show that the element or construction does not affect the mechanical strength and stability of the entire structure, the fire resistance requirements do not apply to these elements or constructions.

The effect of fire on combinations of interconnected elements designed to withstand the loads and ensure the stability of a structure is calculated in accordance with the standards of the LST EN 1991-1-2 series. The design of construction fire safety is performed according to the regulations of the standards of these series - wooden constructions LST EN 1995-1-2.

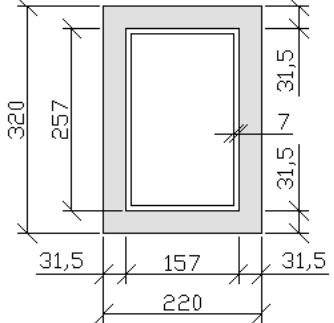
EN 1995-1-2 provides with two methods: indicative and performance-based. Applying an indicative method standard fires are created to produce thermal effects. Applying the performance-based method with reference to fire safety engineering, thermal effects based on physical and chemical parameters are analysed.

Unprotected linear elements (beams, columns) according to LST EN 1995-1-2 can be designed by two methods: a) reduced cross-section, b) deteriorated properties.

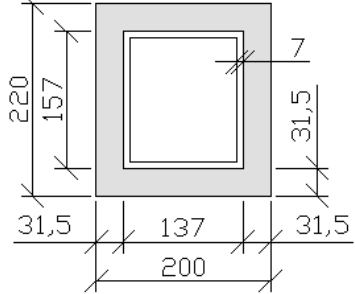
After calculating fire resistance of a bending and compressible element by both methods, a comparison was made, and the results were obtained.

Construction products [8] with a flammability class of at least B – s3, d2 must be used for installation of load-bearing structures, so its fire resistance must be at least 45 minutes.

Design of a bending element

	<p>Given: Dimensions of beam cross-section $b \times h = 0,22m \times 0,32m$; Wood class GL 28h, where the characteristic strength of the bent wood $f_{m,g,k} = 28MPa$; Load during fire: $N = 150kN$; $M = 40kNm$; Fire exposure time $t = 45 \text{ min}$.</p>
<p><i>Method of reduced cross-section</i></p> <p>f_{20} - the 20th percentile of strength at normal temperature is calculated: $f_{20} = k_{fi} \cdot f_k$; Here: f_k - characteristic strength; k_{fi} - coefficient for glued timber $k_{fi} = 1,15$. $f_{20} = 1,15 \cdot 28 = 32,2MPa$; $f_{d,fi} = 1,0 \cdot \frac{32,2}{1,0} = 32,2MPa$; Relative charring depth: $d_{char,n} = \beta_n \cdot t = 0,7 \cdot 45 = 31,5mm$; Effective charring depth: $d_{ef} = d_{char,n} + k_0 d_0 = 31,5 + 1 \cdot 7 = 38,5mm$; The strength of bending elements is checked as follows: $\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{W_d} \leq f_{d,fi}$; Here: M_d - calculated bending moment; W_d - calculated moment of cross-section resistance; $W_d = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{0,143 \cdot 0,243^2}{6} = 0,0014m^4$; $\sigma_{m,d} = \frac{40 \cdot 10^3}{0,0014} = 28,6MPa \leq f_{d,fi} = 32,2MPa$ Thus, that fire resistance of the beam is 45 minutes. After a proximity check, the result is that the maximum fire resistance of the beam is 50 min.</p>	<p><i>Method of deteriorated properties</i></p> <p>$f_{20} = 1,15 \cdot 28 = 32,2MPa$; When $t \geq 20 \text{ min}$, bending force correction coefficient $k_{mod,fi}$ is calculated: $k_{mod,fi} = 1,0 - \frac{1}{200} \frac{p}{A_r}$; Here: p - the perimeter of the residual element exposed to fire in meters; A_r - residual cross-sectional area, m^2. Relative charring depth: $d_{char,n} = \beta_n \cdot t = 0,7 \cdot 45 = 31,5mm$; $p = 2 \cdot (0,157 + 0,257) = 0,828m$; $A_r = 0,157 \cdot 0,257 = 0,0403m^2$; $k_{mod,fi} = 1,0 - \frac{1}{200} \cdot \frac{0,828}{0,0403} = 0,897$; $f_{d,fi} = 0,897 \cdot \frac{32,2}{1,0} = 28,89MPa$; $W_d = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{0,157 \cdot 0,257^2}{6} = 0,00173m^4$; $\sigma_{m,d} = \frac{40 \cdot 10^3}{0,00173} = 23,12MPa \leq f_{d,fi} = 28,89MPa$. Hence, fire resistance of the beam is 45 min. After a proximity check, the result is that the maximum fire resistance of the beam is 55 min.</p>

Design of a compressible element

	<p>Given: Dimensions of column cross-section $b \times h = 0,20m \times 0,22m$; Wood class GL 28h, where the characteristic strength of compressible wood $f_{c,0,g,k} = 26,5MPa$; Load during fire: $N = 500kN$; Fire exposure time $t = 45 \text{ min}$.</p>
<p><i>Method of reduced cross-section</i></p> $f_{20} = k_{fi} \cdot f_k = 1,15 \cdot 26,5 = 30,48MPa;$ $f_{d,fi} = k_{mod,fi} \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}} = 1,0 \cdot \frac{30,48}{1,0} = 30,48MPa;$ <p>Relative charring depth: $d_{char,n} = \beta_n \cdot t = 0,7 \cdot 45 = 31,5mm;$</p> <p>Effective charring depth: $d_{ef} = d_{char,n} + k_0 d_0 = 31,5 + 1 \cdot 7 = 38,5mm;$</p> <p>The strength of compressible elements is checked as follows: $\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{c,d}}{A_{net}} \leq f_{d,fi}$;</p> <p>Here: $N_{c,d}$ - calculated axial compressive force; A_{net} - cross - sectional area, net. $A_{net} = 0,123 \cdot 0,143 = 0,0176m^2;$ $\sigma_{c,0,d} = \frac{500 \cdot 10^3}{0,0176} = 28,41MPa \leq f_{d,fi} = 30,48MPa.$</p> <p>Hence, fire resistance of the column is 45 min. After a proximity check, the result is that the maximum fire resistance of the column is 48 min.</p>	<p><i>Method of deteriorated properties</i></p> $f_{20} = 1,15 \cdot 26,5 = 30,48MPa;$ <p>Relative charring depth: $d_{char,n} = \beta_n \cdot t = 0,7 \cdot 45 = 31,5mm;$</p> $p = 2 \cdot (0,137 + 0,157) = 0,588m;$ $A_r = 0,137 \cdot 0,157 = 0,0215m^2;$ <p>When $t \geq 20 \text{ min}$, compressive force correction coefficient $k_{mod,fi}$ is calculated: $k_{mod,fi} = 1,0 - \frac{1}{125} \frac{p}{A_r} = 1,0 - \frac{1}{125} \cdot \frac{0,588}{0,0215} = 0,781;$</p> $f_{d,fi} = 0,781 \cdot \frac{30,48}{1,0} = 23,81MPa;$ $A_{net} = 0,137 \cdot 0,157 = 0,0215m^2;$ $\sigma_{c,0,d} = \frac{500 \cdot 10^3}{0,0215} = 23,26MPa \leq f_{d,fi} = 23,81MPa.$ <p>Hence, fire resistance of the column is 45 min. After a proximity check, the result is that the maximum fire resistance of the column is 50 min.</p>

When calculating the countable strength of an element under fire conditions by the method of reduced cross-section, the fire correction coefficient $k_{mod,fi}$ is always equal to one.

According to the method of deteriorated properties, it is calculated under formulas depending on whether the element is bent, compressed or tensile, and always $k_{mod,fi} < 1$. Thus, the calculated strength of the elements under fire conditions by the method of deteriorated properties is obtained lower than by the method of reduced cross-section.

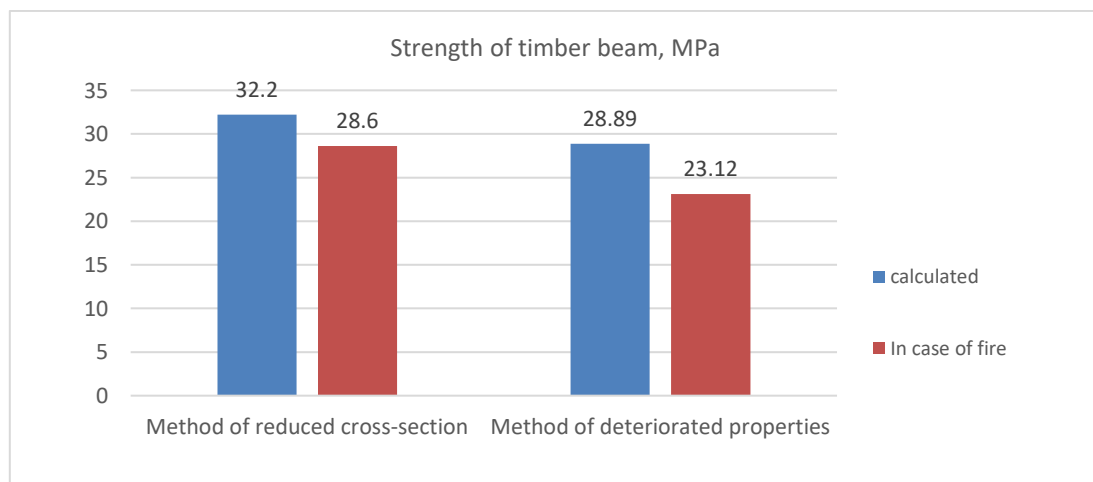


Fig. 1. Strength of timber beam, MPa

Source: Compiled by the authors

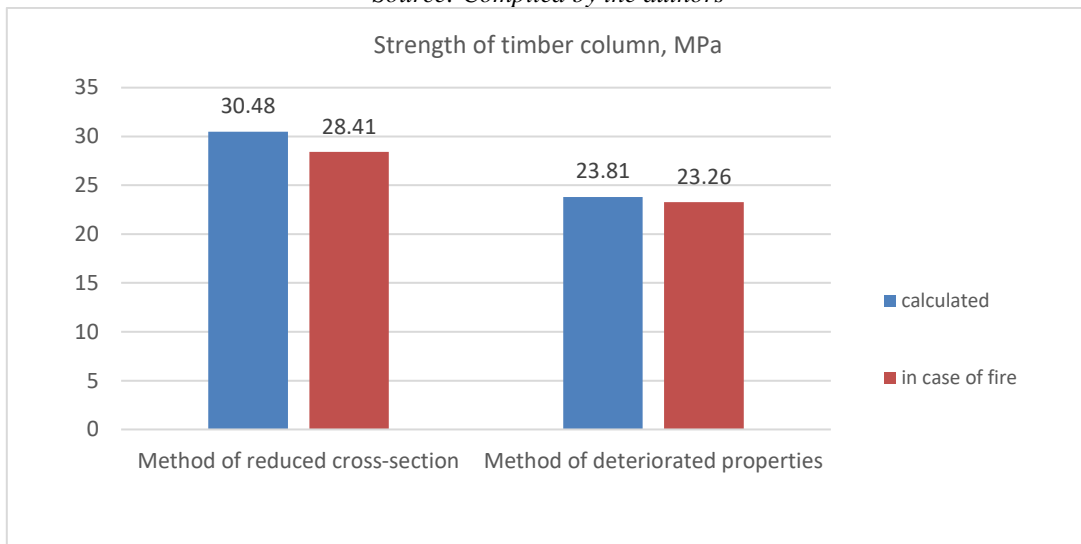


Fig.2. Strength of timber column, MPa

Source: Compiled by the authors

The method of reduced cross-section calculates the possibility of effective cross-sectional load-bearing capacity (subtracting the thickness of the layer whose strength and stiffness are considered to be zero from the initial cross-section), whereas the method of deteriorated properties calculates the possibility of residual cross-sectional load-bearing capacity (which remains after subtracting the charring layer (Fig. 1, 2)).

By calculating the bending and compressible element exposed to fire by these two methods, it can be stated that the initial cross-section of the element is decreased by the method of reduced cross-section more significantly than by the second method. Hence, when calculating by the method of reduced cross-section, the element must withstand the same load as the method of deteriorated properties indicate but with smaller cross-sectional dimensions (the first method imposes higher requirements on strength).

Not only were the strength values of the elements calculated by the method of deteriorated properties, but also the calculated bending (compression) stresses acting on the element. They were obtained lower than calculating by the method of reduced cross-section. It can be stated that the strength of the elements is not calculated as accurately as by the method of reduced cross-section.

The method of deteriorated properties does not provide modification coefficients for shearing, it is only suitable for elements exposed to fire from three or four sides and is not suitable for slabs.

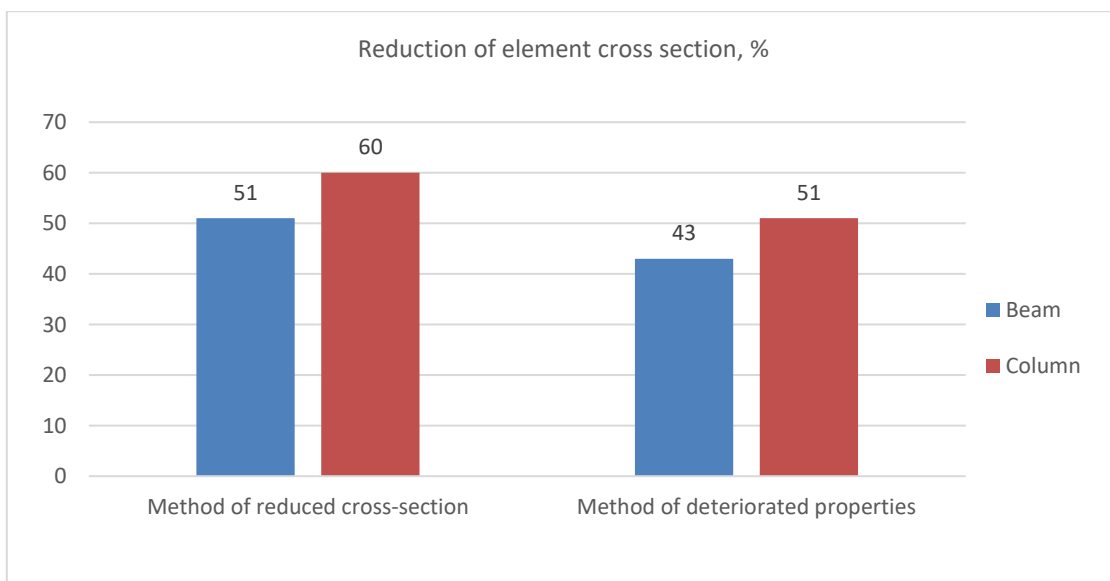


Fig. 3. Reduction of element cross section, %

Source: Compiled by the authors

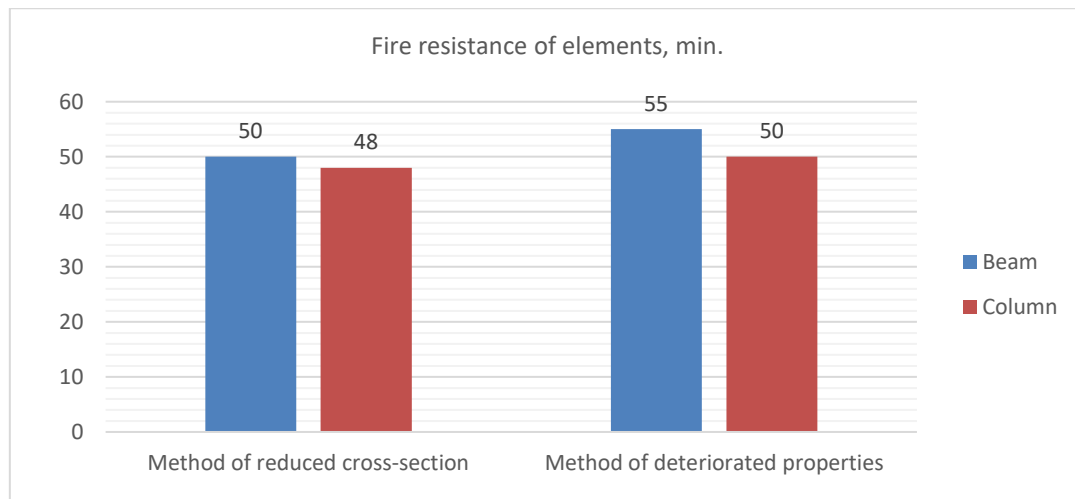


Fig. 4. Fire resistance of elements, min.

Source: Compiled by the authors

The examination reveals that: 1) the maximum fire resistance of the beam by the method of reduced cross-section is 50 min; by the method of deteriorated properties is 55 minutes; 2) maximum fire resistance of the column: by the method of reduced cross-section is 48 min; by the method of deteriorating properties is 50 min (Fig. 3, 4).

The main difference between load-bearing capacity calculation methods is that the method of reduced cross-section calculates the values of wood strength and stiffness under normal temperature conditions but reduces cross-sectional dimensions. Whereas the method of deteriorated properties calculates the possibility of residual cross-sectional load bearing capacity by reducing the calculated strength of the elements.

For practical-engineering calculations, it is recommended to use the method of reduced cross-section as this method is clearer and simpler, at the same time calculation results are obtained on the stock side.

The fire resistance of wooden structures can be increased in several ways: structural (by covering wood surface with non-combustible materials, such as metal, plaster, special fire-resistant gypsum boards); chemical (soaking wood with flame retardant solutions).

Fire resistance of wooden elements can also be increased by choosing cross-sections with a larger margin than usual. When designing wooden structures, it is useful to avoid sharp edges of elements, pursue a lower surface-to-volume ratio of the structure, and foresee surface grinding. These measures extend the period from fire onset to the moment the wood ignites.

In practice, the use of wooden structures in construction employs both structural and chemical fire protection. Whereas LST EN 1995-1-2 considers structures to be protected from fire by cladding, and other possible fire protection measures are puffed coating and impregnation.

In order to increase fire resistance of the entire wooden structure, it is critical to properly design the joints of the elements.

Conclusion

1. More attention has to be paid to the estimation of charring rate if the effect of high temperature does not conform to the standard fire model and temperature curve. EN 1995-1-2 provides with generalized rates of wood charring under standard fire conditions. However, the presented calculation methods do not take the possible unequal temperature distribution in the cross-section into account. Neither the total cross-sectional reduction of elements due to charring and evaporation of moisture in the wood nor the strength of the wood are taken into consideration.

2. When designing fire safety of wooden structures, it is recommended to use the method of reduced cross-section to check load-bearing capacity of structural elements.

3. Fire resistance of wooden structures may be increased by the use of both structural and chemical protective coatings, as well as increasing cross-sections of the elements or by combining these measures with each other, depending on the intended operating conditions.

References

1. Bednarek Z., Kaliszuk-Wietecka A. Analysis of the fire-protection impregnation influence on wood strength. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2007, 13(2): p. 79-85.

2. Gaisrinės saugos pagrindiniai reikalavimai. Valstybės žinios, 2010-12-14, Nr. 146-7510.
3. Hietaniemi J., Korhonen T. A case study of performance of load-bearing wooden structures in natural fire. Proceedings of the 8th world conference on timber engineering. Finland, 2004, p. 329-334.
4. König J., Fontana M., The performance of timber connections in fire – test results and rules of Eurocode 5, RILEM Proceedings: Joints in Timber Structures. 2001, p. 639-648.
5. LST EN 1995-1-1:2005. Eurocode 5. Design of timber structures - Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings.
6. LST EN 1995-1-2:2005. Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-2: General – Structural fire design.
7. Mikkola E. Review of reaction to fire performance of wood based products. Proceedings of the 8th world conference on timber engineering. Finland, 2004, p. 313-318.
8. STR. 2.01.01(2):1999. Esminiai statinio reikalavimai. Gaisrinė sauga. Valstybės žinios, 2000-02-25, Nr. 17-424
9. STR. 2.05.07:2005. Medinių konstrukcijų projektavimas. Valstybės žinios, 2005-02-22, Nr. 25-818.
10. Šiaučiuvėnas G., Griškevičius M. Medinių centriškai gniuždomų elementų elgsenos ugnyje eksperimentinių tyrimų rezultatai. Statybinės konstrukcijos konferencijos pranešimų medžiaga. Vilnius, 2009, p. 135-142.

MEDINIŲ KONSTRUKCIJŲ ATSPARUMO UGNIAI SKAIČIAVIMO METODŲ ANALIZĖ

Santrauka

Vienas iš esminių statinio reikalavimų – gaisrinės saugos – nurodo, kad kilus gaisrui statinio laikančios konstrukcijos tam tikrą laiką turi išlaikyti apkrovas bei riboti ugnies ir dūmų plitimą statinyje.

Medinės konstrukcijos plačiai naudojamos statyboje, todėl ir jų atsparumo ugniai klausimai yra svarbūs.

Straipsnyje atlikta medinių elementų atsparumo ugniai skaičiavimo metodų analizė. Pateikti elementų projektavimo ugniai atsparumui pavyzdžiai, atlikta rezultatų analizė ir skaičiavimo metodų palyginimas bei pateikti pasiūlymai medinių konstrukcijų atsparumo ugniai padidinimui.

Reikšminiai žodžiai: medinės konstrukcijos, degumas, anglėjimo sparta, projektavimas.

AUTORIŲ LYDRAŠTIS

Autoriaus vardas, pavardė: Jūratė Mockienė

Mokslo laipsnis ir vardas: Magistras, lektorė

Darbo vieta ir pozicija: Kauno technikos kolegija, Statybos inžinerijos studijų programa, lektorė

Autoriaus mokslinių interesų sritys: Stiprumas, korozija, pleišėjimas, irimas, efektyvios konstrukcijos.

Telefonas ir el. pašto adresas: 8 68227397, jurate.mockiene@edu.ktk.lt

Autoriaus vardas, pavardė: Loreta Inokaitytė

Mokslo laipsnis ir vardas: Lektorė

Darbo vieta ir pozicija: Kauno technikos kolegija, Statybos inžinerijos studijų programa, lektorė

Autoriaus mokslinių interesų sritys: Statybos konjunktūra

Telefonas ir el. pašto adresas: 8 60715057, loreta.inokaityte@edu.ktk.lt

BETONO SU SMULKIOS FRAKCIJOS KANAPIŲ SPALIŲ UŽPILDAIS TYRIMAI

Vincas Gurskis^{1,2}, Dainius Ramukevičius^{1,2}, Tomas Rakauskas¹

¹Vytauto Didžiojo universitetas, ²Kauno technikos kolegija

Anotacija

Lietuvos Respublikos statybos įstatymas įpareigoja statyti statinius, kurie atitiktų esminius statinio reikalavimus, tame tarpe energijos taupymo ir šilumos išsaugojimo bei tvaraus gamtos išteklių naudojimo. Vienas iš alternatyvių šio reikalavimo įgyvendinimo būdų - tai panaudojimas mažai laidžių šilumai medžiagų, pagamintų iš atsinaujinančių žaliavų su mažomis energijos sąnaudomis.

Žemės ūkio produkcijos gamyboje gaunami šalutiniai produktai, kurie galėtų būti panaudoti statybinių medžiagų gamybai. Prie tokių medžiagų priskiriamos pluoštinių kanapių perdirbimo atliekos. 2013 m. priėmus Lietuvos Respublikos pluoštinių kanapių įstatymą nuo 2014 m. leista auginti pluoštines kanapes, todėl jų perdirbimo atliekos – spaliai - galėtų būti panaudotos kaip užpildas termoizoliaciniam betonui gaminti. Tokių betonų gamyboje dažniausiai naudojami rišamųjų medžiagų mišiniai kalkių, cemento, gipso pagrindu. Nuo rišamųjų medžiagų sudėties priklauso sukietėjusio betono fizikinės bei mechaninės savybės. Norint gauti gerų termoizoliacinių bei mechaninių savybių betoną, būtina parinkti optimalią rišamųjų medžiagų sudėtį.

Tyrimams naudotos rišamosios medžiagos kalkių pagrindu: hidratinės (gesintos) ir kalcitinės negesintos kalkės. Taip pat naudotas mineraliniai priedai: metakaolinas bei opoka. Iširtos 8-ių sudėčių rišamosios medžiagos. Geriausių rodiklių parodžiusios rišamosios medžiagos pagrindu atlikti termoizoliacinio betono, kuriam panaudoti 0...4 mm dydžio malti kanapių spaliai, tyrimai. Nustatytas šio betono tankis, stipris, susitraukimas kietėjant, šilumos laidumas.

Reikšminiai žodžiai: betonas, pluoštinės kanapės, medžiagų savybės

Įvadas

Siekdama sušvelninti klimato kaitą Europos Sąjunga įgyvendina ambicingus šiltnamio dujų mažinimo tikslus įvairiuose ūkio sektoriuose. Pagrindinis jos tikslas – iki 2030 m. ES viduje išmetamų šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekį sumažinti ne mažiau kaip 40 proc., palyginti su 1990 m. Vienas iš svarbių žingsnių Europos Sąjungos institucijų pastaraisiais metais yra sprendimų priėmimas dėl energijos suvartojimo mažinimo ir medžiagų, kurios gaminamos iš atsinaujinančių šaltinių naudojimo statybos sektoriuje. Tai įpareigoja ir priimta 2010 m. gegužės 19 d. Europos Parlamento ir Tarybos direktyva 2010/31/ES dėl pastatų energinio naudingumo. Direktyvos nuostatos įpareigoja ES valstybes nares statybos sektoriuje padidinti energijos naudojimo efektyvumą ir sumažinti bendrą išmetamų šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekį 20 proc., skatinti naudoti atsinaujinančias medžiagas statybinių medžiagų ir konstrukcijų gamyboje. Norint taikyti direktyvos nuostatas, reikia, kad statybų sektorius pereitų prie naujoviškų technologijų, tvarių ir ekologiškų žaliavų statybinėms medžiagoms gaminti (Stevulova *et al.* 2012).

Lietuvos Respublikos statybos įstatymas įpareigoja statyti statinius, kurie atitiktų esminius statinio reikalavimus, tame tarpe energijos taupymo ir šilumos išsaugojimo bei tvaraus gamtos išteklių naudojimo. Šie reikalavimai įgyvendinami naudojant mažai laidžias šilumai iš atsinaujinančių žaliavų ir mažomis energijos sąnaudomis pasižyminčias tiek šilumą izoliuojančias, tiek apdailos medžiagas, tame tarpe termoizoliacinius tinkavimo ir mūro skiedinius. Mūrijimo, tinkavimo darbams dažniausiai naudojami kalkiniai, cementiniai skiediniai (Korjenica *et al.* 2011). Kalkiniai skiediniai buvo naudojami šimtmečiais kaip akmenų mūro rišamoji medžiaga senoviniuose pastatuose. 20 amžiuje kalkių naudojimą laikančiose konstrukcijose išstūmė cementai. Per pastaruosius dešimtmečius dėl išaugusio poreikio statyti gamtai draugiškus pastatus su organiniais užpildais, susidomėjimas kalkiniais mišiniais vėl atsirado, nes kietėjant kalkėms nereikia šių mišinių drėkinti.

Energiją tausojantis būstas, vietinių ekologiškų žaliavų naudojimas statybinėms medžiagoms, tai naujas požiūris į aplinką. Aplinkosauginis sąmoningumas dabar apsiriboja ne tik energijos taupymu, bet ir ekologiškai pagrįsta pastatų konstrukcija, t.y. izoliacinių medžiagų gamyba, montavimas ir jų naudojimas turi išsiskirti mažiausiu energijos kiekiu, išteklių suvartojimu ir tarša.

Siekiant sumažinti išmetamų kenksmingų dujų kiekį atmosferoje, statybinių medžiagų gamybai galėtų būti naudojami vietiniai žemės ūkio produkcijos šalutiniai produktai. Statybinėms medžiagoms gaminti tinkama naudoti pluoštinių kanapių spaliai, pluošto likučiai, smulkinti kanapių stiebai (Balčiūnas, 2015, Sinka *et al.* 2015, Troëdec *et al.* 2009). Pluoštinė kanapė, kaip sparčiai augantis augalas, perspektyvus ne tik kaip atsinaujinanti biomasės energija, bet ir statybinė medžiaga, atitinkanti tvarų plėtros principą (Troëdec *et al.* 2009). Pastaraisiais metais novatoriškų, ekologiškų statybinių medžiagų kūrime ypatingas dėmesys skiriamas pluoštinių kanapių naudojimui įvairiems tikslams pvz., izoliacinėms plokštėms gaminti, kaip užpildas kanapių betono gamyboje, ar kaip kompozito panaudojimas įvairių statybinių medžiagų gamyboje. Šiuo metu Europoje

kanapių pluoštas dažniausiai naudojamas betonų gamyboje, kaip užpildas, panaudojant rišiklį – kalkes arba kalkių ir kitų priedų mišinius.

Kaip pažymima straipsnyje (Siddique, Klaus, 2009) pastato siena iš pluoštinių kanapių betono pakankamai šilta, kai naudojami kanapių užpildai ir kalkių pagrindu pagaminta rišamoji medžiaga yra tam tikros sudėties. Tokios rišamosios medžiagos sudėtis – ilgų tyrimų, didelės apimties bandymų rezultatas. Dažniausiai gamintojai neatskleidžia rišamosios medžiagos sudėties.

Kiekvienas statytojas stengiasi pastatyti pastatą kuo mažesnėmis sąnaudomis. Lietuvoje statomų pastatų, naudojant sienoms kanapių betoną su užsienyje pagamintomis užpildų rišamosiomis medžiagomis, statybų kaina pakankamai didelė. Tokia situacija lemia naujų inovatyvių rišamųjų medžiagų paiešką. Gali būti naudojami skirtingo stambumo kanapių spalių užpildai. Stambesni spaliai tinka didesnio storio sluoksniams, smulkesni – naudojami mažo storio sluoksniams, pvz., termoizoliaciniams tinkams. Kaip pažymima straipsnyje (Aglia et al. 2020) kanapių spalių miltai pasižymi geromis šiluminėmis ir akustinėmis savybėmis ir yra veiksmingas užpildas gaminant izoliacinį tinką. Būtina vykdyti tyrimus, siekiant nustatyti skirtingų paskirčių betono termoizoliacines ir kitas savybes.

Gaminant betoną su kanapių spalių užpildais naudojamos įvairios mineralinės rišamosios medžiagos: cementas, gesintos (hidratinės) ir negesintos kalkės, gipsas, molis, jų mišiniai, taip pat naudojamos organinės rišamosios medžiagos: krakmolai ir kt. Daugiausia tyrimų atliktą naudojant hidraulinės kalkės bei jų mišinius su aktyviais mineraliniais priedais. Dažniausiai tyrėjai nepaaiškina kodėl tyrimams pasirenka vienos ar kitos sudėties rišamąsias medžiagas.

Šio darbo tikslas – parinkti optimalią rišamosios medžiagos sudėtį kalkių pagrindu ir nustatyti betono su 0/4 mm frakcijos kanapių spaliais fizikines, mechanines ir termoizoliacines savybes.

Tyrimo metodai

Siekiant nustatyti optimaliomis savybėmis pasižyminčią rišamąją medžiagą kanapių spalių betonui iširta 8-ių sudėčių (1 lentelė) rišamosios medžiagos tešlos ir iš jų pagaminti sukietėję bandiniai. Tyrimams naudotos rišamosios medžiagos kalkių pagrindu: Lenkijoje gaminamos hidratinės (gesintos) ir kalcitinės negesintos kalkės, Prancūzijoje gaminami specialieji komerciniai rišamųjų medžiagų mišiniai, skirti kanapių spalių betonui: „Tradical PF 70“ ir „Tradical PF 70 thermo“. Taip pat naudoti Lietuvoje gaminami ar išgaunami mineraliniai miltelių formos priedai: metakoalinas ir opoka. Metakoalinas labai dažnai naudojamas kaip pucolaninė medžiaga skiedinyje ir betone, siekiant pagerinti skiedinio ir betono mechanines ir ilgaamžiškumo savybes.

1 lentelė

Rišamųjų medžiagų sudėties vieneto dalimis

Sudėties Nr	Hidratinės kalkės	Kalcitinės negesintos kalkės	Metakoalinas	Opoka	Tradical PF 70	Tradical PF 70 thermo
1	0,8825	0,1175	-	-	-	-
2	0,75	0,10	0,15	-	-	-
3	0,75	0,10	-	0,15	-	-
4	0,75	0,25	-	-	-	-
5	-	-	-	-	1,00	-
6	-	-	-	-	-	1,00
7	0,50	0,50	-	-	-	-
8	0,75	0,25	-	-	-	-

Pirmiausiai pagal LST EN 196-7 metodiką nustatytos vandens sąnaudos normalaus tirštumo tešloms gauti. Po to pagaminti prizmių formos bandiniai 40×40×160 mm. Jie kietėjo 1 parą formoje ir 27 paras ore, kurio santykinis drėgnis 40-60 %. Tuomet nustatytos susitraukimo deformacijos, lenkimo ir gniuždymo stipriai (LST EN 196-1), tankio pokytis džiūvimo metu. Pagal bandymo rezultatus nustatyta geriausiomis fizikinėmis-mechaninėmis savybėmis pasižyminti rišamoji medžiaga, kuri panaudota tolimesniems bandymams tiriant betoną su maltais 0-4 mm kanapių spalių užpildais (toliau – kanapių betoną). Taip pat naudotas geriamasis vandentiekio vanduo.

Iš pagaminto mišinio suformuoti prizmių formos bandiniai 40×40×160 mm. Iš kiekvienos mišinio sudėties serijos pagaminta po 3 bandinius. Laboratorijos sąlygomis 28 d. iki pastovios masės išdžiūvusiems (orasausiams) bandiniams nustatytos susitraukimo deformacijos, tankis, lenkimo ir gniuždymo stipris. Gniuždymo stipris nustatytas gniuždant bandinius mechaninių bandymų mašina iki 10 % deformacijos pagal standartus LST EN 12390-3:2009, LST EN 826:2013.

Šilumos laidumo koeficientui nustatyti pagaminti plytelės formos bandiniai, kurios matmenys 200×200×(40...50) mm. Šilumos laidumo koeficientas nustatytas naudojant FOX 200 šilumos srauto matuoklį, kuris skirtas matuoti šilumos laidumui pagal standartus LST EN 12667:2002, ASTM C518 ir ISO 8301. Prietaise yra plonasluksniai šilumos srauto keitikliai, skaitmeniniai storio matuokliai ir valdoma temperatūros kontrolė. Prietaiso veikimas paremtas kietojo kūno vėsinimu / šildymu.

Tyrimų rezultatai

Tiriant 8-ių sudėčių (1 lentelė) rišamąsias medžiagas pirmiausiai nustatytos vandens sąnaudos normalios konsistencijos tešlai gauti (2 lentelė).

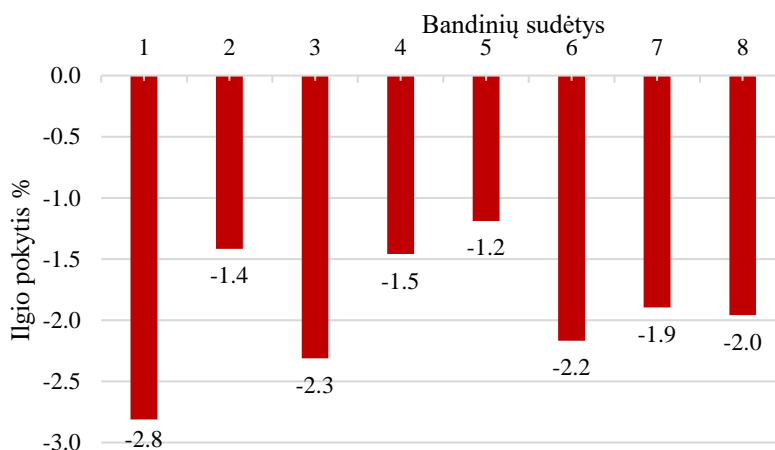
2 lentelė

Rišamųjų medžiagų vandens sąnaudų normalios konsistencijos tešlai gauti bandymo rezultatai

Sudėtis	1	2	3	4	5	6	7	8
V/R. m.	0,525	0,50	0,55	0,55	0,613	0,613	0,816	0,894

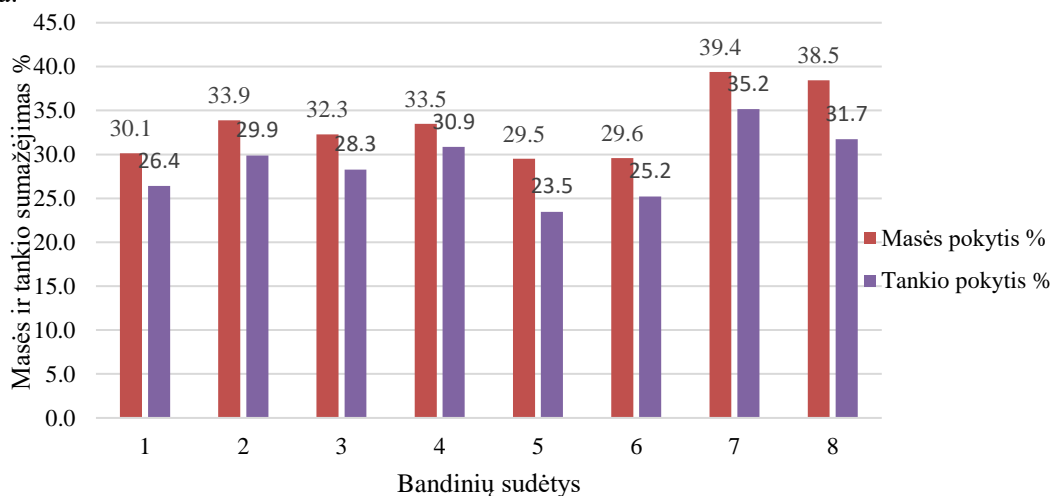
Pastaba: V/R.M. – vandens ir rišamųjų medžiagų masių santykis.

Mažiausiomis vandens sąnaudomis pasižymi 2-os sudėties rišamosios medžiagos tešla su metakaolino priedu. Sukietėjus iš tešlos suformuotiems bandiniams nustatytos susitraukimo deformacijos (1 pav.), tankio (2 pav.) bei lenkimo ir gniuždymo stipris (3 pav.).



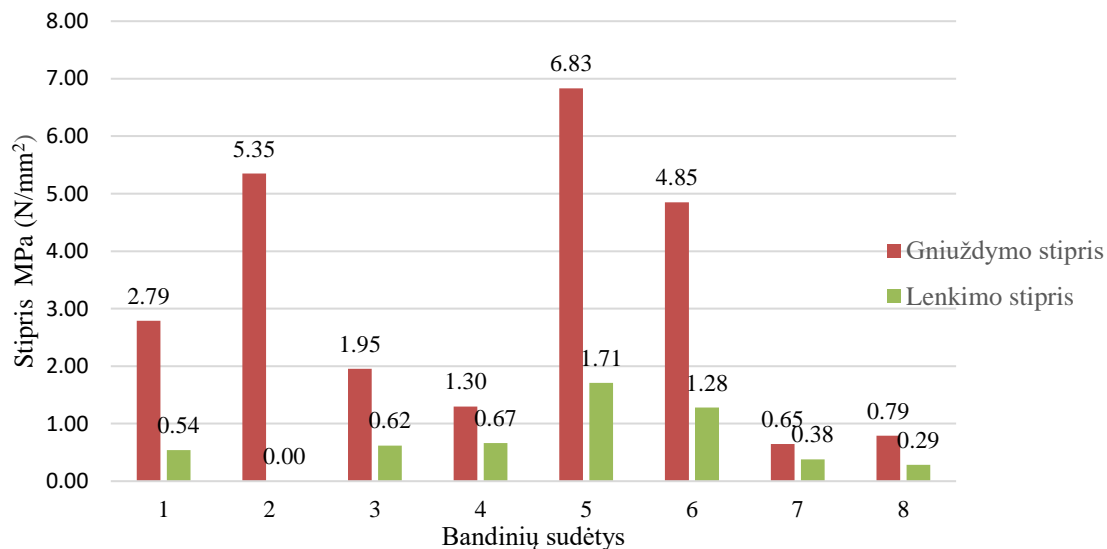
1 pav. Iš normalaus tirštumo rišamųjų medžiagų tešlų suformuotų bandinių ilgio pokytis, kietėjimo-džiūvimo metu

Mažiausiomis susitraukimo deformacijomis pasižymi 5-os sudėties bandiniai su Tradical PF 70 rišamąja medžiaga.



2 pav. Iš normalaus tirštumo rišamųjų medžiagų tešlų suformuotų bandinių masės ir tankio sumažėjimas, kietėjimo-džiūvimo metu

Rezultatai rodo, kad visų sudėčių bandiniai pasižymi dideliu masės ir tankio sumažėjimu, tačiau mažiausias šis pokytis 5-os sudėties bandinių su Tradical PF 70 rišamąja medžiaga.



3 pav. Iš normalaus tirštumo rišamųjų medžiagų teslų suformuotų bandinių lenkimo ir gniuždymo stipris

Gauti stiprio rezultatai rodo, kad daugelio sudėčių bandinių gniuždymo stipris 1,7-4 kartus didesnis nei lenkimo stipris, tačiau didžiausiu stipriu pasižymi 5, 6 sudėčių bandiniai su firmos Tradical rišamąja medžiaga, nedaug mažesnis yra 2-os bandinių su metakaolino priedu gniuždymo stipris.

Įvertinus visus nustatytus rodiklius nustatyta, kad geriausiomis fizikinėmis-mechaninėmis savybėmis pasižymi bandiniai, suformuoti naudojant „Tradical PF 70“ rišamąją medžiagą. Toliau seka rišamoji medžiaga, sudaryta iš hidratinių (75 %) ir negesintų kalkių (10 %) ir metakaolino priedo (15 %) mišinio. Ši medžiaga, kaip žymiai pigesnė nei pagaminta Prancūzijoje, pasirinkta tolimesniems kompozito tyrimams.

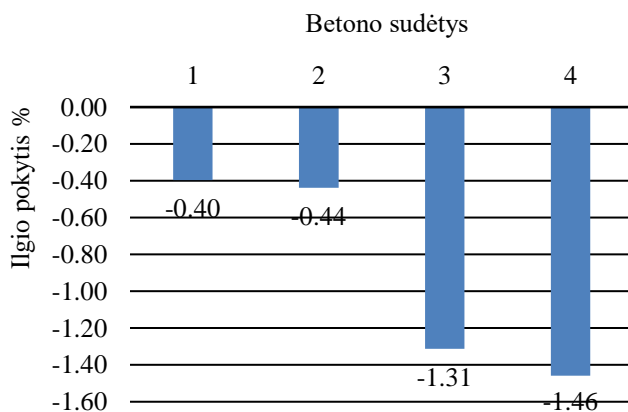
Tiriant kanapių spalį betono kompozitą pagaminti keturių sudėčių bandiniai, naudojant rišamosios medžiagos ir spalį masių santykį 2:1 ir 3:1 bei skirtingas vandens sąnaudas (3 lentelė).

3 lentelė

Kanapių betono mišinių sudėtys

Betono sudėtis	Rišamųjų medžiagų ir užpildų santykis	Sudėtis vieneto dalimis					V/R.M
		Hidratinės kalkės	Kalcitinės negesintos kalkės	Metakaolinas	Kanapių spaliai 0/4	Vanduo	
1	2:1	0,274	0,036	0,055	0,182	0,453	1,24
2	3:1	0,330	0,044	0,066	0,147	0,413	0,94
3	2:1	0,223	0,045	0,030	0,149	0,554	1,86
4	3:1	0,273	0,055	0,036	0,122	0,514	1,41

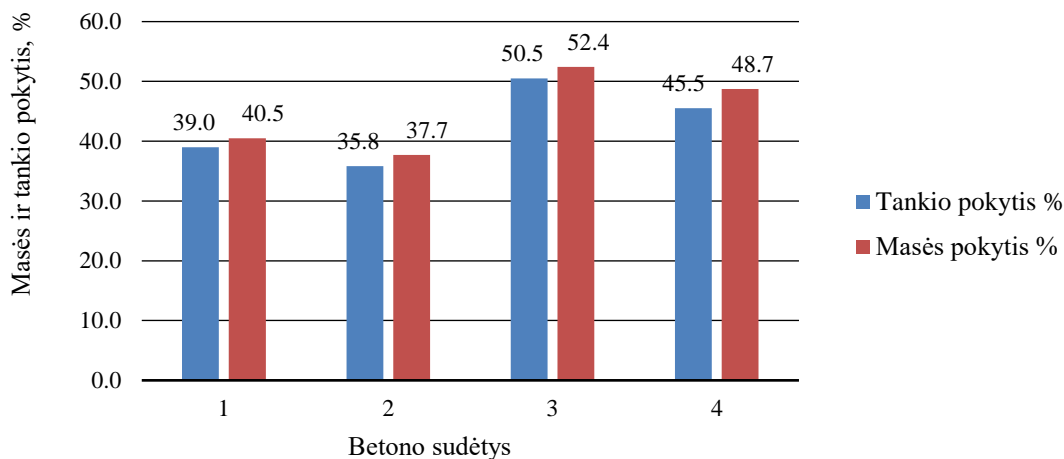
Pirmiausiai nustatytas bandinių ilgio pokytis tarp pradinio ilgio (160 mm) ir orasausio bandinio ilgio po 14 kietėjimo-džiūvimo parų (4 pav.).



4 pav. Kanapių betono bandinių ilgio sumažėjimas kietėjimo orasausėmis sąlygomis metu

Susitraukimo kietėjimo metu tyrimo rezultatai rodo, kad šios deformacijos labiau priklauso nuo vandens kiekio (pastarajam didėjant susitraukimo deformacijos taip pat didėja), nei nuo rišamųjų medžiagų ir kanapių spalių užpildų santykio.

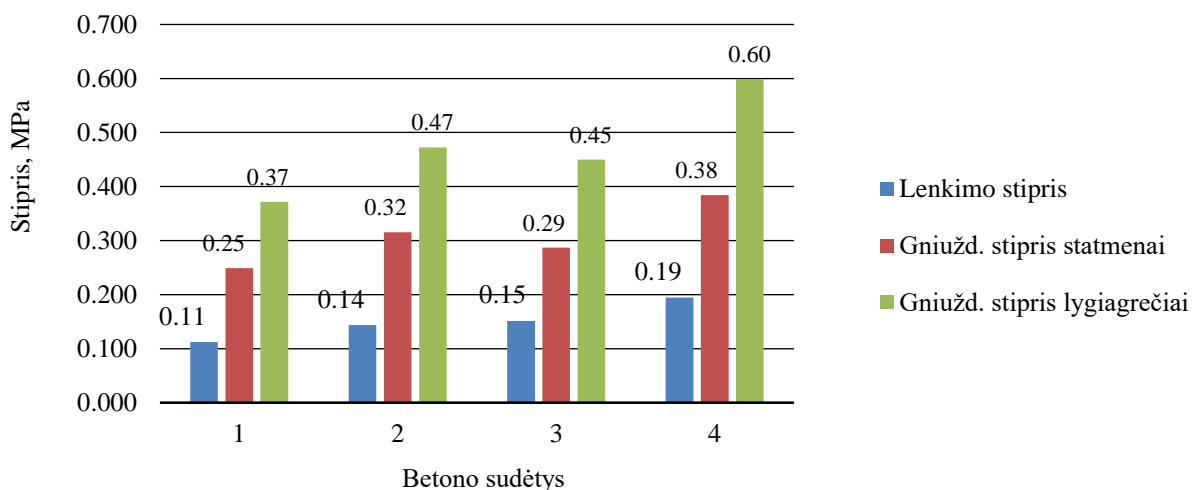
Bandinių masės pokytis (sumažėjimas) nustatytas pasveriant iš formų po paros išimtus bandinius ir vėl pasveriant prieš atliekant lenkimo ir gniuždymo stiprio bandymus. Bandinių, išbuvusių orasausėje aplinkoje 14 parų, masės ir tankio pokyčiai pateikti 5 pav.



5 pav. Kanapių betono bandinių masės ir tankio sumažėjimas kietėjimo orasausėmis sąlygomis metu

Remiantis 5 pav. pateiktais rezultatais nustatyta, kad masės pokyčiai didesni nei tankio, nes keičiasi džiuostančių bandinių tūris, kad labiau šie rodikliai sumažėja kai gamybai naudojama daugiau vandens (didesnis V/R.m.). Šie rezultatai taip pat įrodo, kad reikia kanapių betoną gaminti su mažesniais vandens sąnaudomis. Iš gautų duomenų matyti, kad kai rišamosios medžiagos ir spalių masių santykis 3:1 bandiniai pasižymi mažesniu masės ir tankio pokyčiu, nei bandiniai kai šis santykis 2:1.

Tyrimų metu atlikti lenkimo ir gniuždymo stiprio bandymai. Bandinių lenkimo stipriui nustatyti iš kiekvienos sudėties tirta po tris bandinius. Gniuždymo stipriui nustatyti buvo panaudota stiprio lenkiant metu gautos bandinių puselės. Viena puselė buvo panaudota nustatyti gniuždymo stipriui statmenai formavimo plokštumai, kita – lygiagrečiai formavimo plokštumai. Gauti rezultatai pateikti 6 pav.

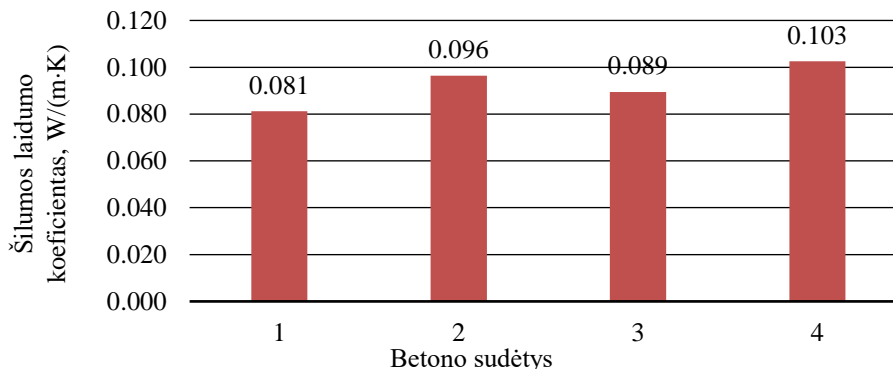


6 pav. Kanapių betono bandinių lenkimo ir gniuždymo stipriai, kai bandiniai gniuždomi statmenai ir lygiagrečiai formavimo kryptims

Gauti rezultatai rodo, kad gniuždymo stipris bandinius spaudžiant formavimo kryptimi yra 1,5-1,6 karto didesnis nei spaudžiant jai statmena kryptimi, t.y. kanapių betonai pasižymi anizotropiškumu. Didžiausiu lenkimo stipriu (0,19 MPa) ir gniuždymo stipriu statmenai (0,38 MPa), tiek lygiagrečiai (0,60 MPa) formavimo plokštumai pasižymi 4-os sudėties bandiniai. 3-os sudėties bandinių lenkimo stipris (0,15 MPa) yra mažesnis 22,6 % už 4-os sudėties bandinių lenkimo stiprį. 2-os sudėties bandinių gniuždymo stipris (0,32 MPa) statmenai formavimo plokštumai mažesnis 15,8 %, už 4-os sudėties bandinių stiprį, o stipris lygiagrečiai (0,47

MPa) mažesnis – 21,7 %. Lenkimo stipris 2-os sudėties bandinių mažesnis 5,3 % už 3-os sudėties bandinių stiprį. 2-os ir 3-os sudėčių bandinių stiprių rodikliai labai panašūs. Pagal gautus duomenis galima teigti, kad bandiniai, turintys didesnę tankį, pasižymi ir didesniu stipriu.

Šilumos laidumo koeficientas (λ) viena iš pagrindinių termoizoliacinių medžiagų savybių. Tyrimams naudoti bandiniai, kietėję 28 paras orausėje laboratorijos aplinkoje. Gauti šilumos laidumo matavimo rezultatai pateikti 7 pav.



7 pav. Kanapių betono bandinių šilumos laidumo koeficientai

Mažiausiu šilumos laidumo koeficientu pasižymi 1-os sudėties kanapių betonas (0,081 W(m·K)). 10,1 % didesniu šilumos laidumu pasižymi 3-os sudėties betonas. Dar didesniu šilumos laidumu pasižymi 2-os sudėties betonas. Jo šilumos laidumo koeficientas (0,096 W(m·K)) didesnis 18,7 % lyginant su 1-os sudėties betonu. Didžiausiu šilumos laidumu pasižymi 4-os sudėties betonas, kurio šilumos laidumo koeficientas (0,103 W(m·K)) 26,9 % didesnis lyginant su 1-os sudėties betonu. Iš gautų duomenų matyti, kad kai rišamosios medžiagos mišinio ir spalių pagal masę santykis 2:1 bandiniai pasižymi mažesniu šilumos laidumo koeficientu. Galima teigti, kad yra tiesioginė tankio įtaka šilumos laidumo koeficientui, kuo mažesnis tankis, tuo medžiaga mažiau laidu šilumai.

Geriausiomis mechaninėmis ir termoizoliacinėmis savybėmis pasižymintį kanapių betono nustatymui, naudoti visų 4-ųjų serijų bandinių gauti rezultatai. Geriausiam parametro rezultatui suteikiamas 1 balas, prasčiausiam 0 balų, tarpiniai balai suteikti vertinant pagal parametro rezultatą tarp kitų serijų rezultatų reikšmių. Vertinimai atlikti pagal gautus bandymų rezultatus. Susumavus visus balus nustatoma geriausia betono mišinio sudėtis, kuri gali būti naudojama gaminant kanapių betoną su spalių užpildais. Geriausių savybių kanapių betono mišinio sudėties nustatymui sudaroma 4 lentelė.

4 lentelė

Tyrimų rezultatų vertinimas balais

Betono sudėtys	Ilgio pokytis	Tankio ir masės pokytis	Lenkimo stipris	Gniuždymo stipris	Šilumos laidumas	Balų suma
1	1,00	0,80	0,00	0,00	1,00	2,8
2	0,96	1,00	0,37	0,50	0,29	3,1
3	0,14	0,00	0,47	0,33	0,62	1,6
4	0,00	0,30	1,00	1,00	0,00	2,3

Geriausiai pasižymintiomis kanapių betono medžiagos savybėmis nustatyta 2-os serijos bandiniai, kurių lenkimo stipris sudaro 37 %, gniuždymo stipris 50 %, šilumos laidumas 29 %, tankio ir masės pokytis 100%, o ilgio pokytis 96 %.

Išvados

1. Ištyrus 8-ųjų sudėčių rišamasias medžiagas kalkių pagrindu, pagal vandens sąnaudas normalaus tirštumo tešlai, bandinių susitraukimo deformacijas kietėjimo metu, lenkimo ir gniuždymo stiprį nustatyta, kad geriausiomis fizikinėmis-mechaninėmis savybėmis pasižymi bandiniai, suformuoti naudojant „Tradical PF 70“ rišamąją medžiagą. Toliau seka rišamoji medžiaga, sudaryta iš hidratinių (75 %) ir negesintų kalkių (10

%) ir metakolino priedo (15 %) mišinio. Ši medžiaga, kaip žymiai pigesnė nei pagaminta Prancūzijoje, pasirinkta tolimesniems kompozito su kanapių spaliais tyrimams.

2. Vertinant kanapių betono bandinių ilgio pokyčius nustatyta, kad bandiniai, kuriems gaminant naudota daugiau vandens pasižymi didesniu susitraukimu kietėjimo metu.

3. Atlikus betono, pagaminto su kanapių spalų užpildais, tankio ir masės pokyčio tyrimus nustatyta, kad mažiausiu pokyčiu pasižymi bandiniai, esant rišamosios medžiagos ir užpildų masių santykiui 2:1.

4. Gniuždymo stiprio rezultatai rodo, kad betonas su kanapių spalų užpildais esant rišamosios medžiagos ir užpildų masių santykiui 2:1 yra silpnesnis už betoną, kurio rišamosios medžiagos ir užpildų masių santykis 3:1. Be to, gniuždymo stipris bandinius spaudžiant formavimo kryptimi yra 1,5-1,6 karto didesnis nei spaudžiant jai statmena kryptimi.

5. Šilumos laidumo tyrimo rezultatai rodo, kad didžiausiu laidumu pasižymi betonas, kurio rišamosios medžiagos ir užpildų masių santykiui 3:1 ir kurio gamybai panaudotas mažesnis vandens kiekis (vandens ir rišamųjų medžiagų masių santykis – 1,41).

6. Atlikus kanapių betono su spalų užpildais lenkimo ir gniuždymo stiprio, šilumos laidumo ir kitus bandymus, nustatyta, kad geriausiomis fizikinėmis ir mechaninėmis savybėmis pasižymi kompozitas, sudarytas iš rišamosios medžiagos ir spalų, kai jų masių santykis 3:1, o vandens ir rišamųjų medžiagų masių santykis – 0,94.

Literatūra

1. Agliata, R.; Marino, A.; Mollo, L.; Pariso, P. 2020. Historic Building Energy Audit and Retrofit Simulation with Hemp-Lime Plaster—A Case Study. *Sustainability* 2020, 12, 4620.
2. Balčiūnas G. Statybinių kompozitų su pluoštinių kanapių spaliais tyrimai. Daktaro disertacija. Technologijos mokslai, medžiagų inžinerija (08T). Vilnius, Technika, 2015. 134 p.
3. Korjenica A., Petranekb V., Zachb J., Hroudovab J. 2011. Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources. *Energy and Buildings* 43, 2518–2523.
4. Lietuvos Respublikos pluoštinių kanapių įstatymas.
5. LST EN 12350-6:2009. Betono mišinio bandymai. 6 dalis. Tankis.
6. LST EN 12390-3:2009. Betono bandymas. 3 dalis. Bandinių gniuždomasis stipris.
7. LST EN 12390-7:2009. Betono bandymas. 7 dalis. Sukietėjusio betono tankis.
8. LST EN 12667:2002. Šiluminės statybinių medžiagų ir gaminių savybės. Šiluminės varžos nustatymas apsaugotos karštosios plokštės ir šilumos srauto matuoklio metodais. Didelės ir vidutinės šiluminės varžos gaminiai.
9. LST EN 196-1:2016 Cemento bandymų metodai. 1 dalis. Stiprio nustatymas.
10. LST EN 196-7:2008+P:2008 Cemento bandymo metodai. 7 dalis. Cemento ėminių ėmimo ir paruošimo metodai.
11. LST EN 826:2013. Statybiniai termoizoliaciniai gaminiai. Elgsenos gniuždant nustatymas.
12. Siddique R., Klaus J. 2009. Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. 2008. *Applied Clay Science*. Volume 43, 392-400.
13. Sinka, M., Radina, L., Sahmenko, G., Korjakins, A., Bajare, D. 2015. Enhancement of lime-hemp concrete properties using different manufacturing technologies. *Academic journal of civil engineering*. Volume 33 No 2 (2015). 301-308.
14. Stevulova, N., Kidalova, L., Junak, J., Cigasova, J. and Terpakova, E. 2012. Effect of hemp shive sizes on mechanical properties of lightweight fibrous composites. *Procedia Engineering*, Volume 42, 496-500.
15. Troëdec M., Peyratout C., Smith A., Chotard T. 2009 „Influence of various chemical treatments on the interactions between hemp fibres and a lime matrix“. *Journal of the European Ceramic Society* 29(10),1861-1868.

INVESTIGATION OF HEMP CONCRETE PRODUCED WITH FINE FRACTION HEMP SHIVES

Summary

The Law on Construction of the Republic of Lithuania obliges the construction of buildings that meet the essential requirements of the building, including energy saving and heat conservation and sustainable use of natural resources. One alternative way of implementing this requirement is to use low-heat-conducting materials made from low-energy renewable raw materials.

The production of agricultural products produces by-products that could be used for the production of building materials. Such materials include waste from the processing of hemp grown for fiber. Fiber hemp and its processing waste have recently been legalized in Lithuania and could be used as filler for the production of thermal insulation concrete. Lime and cement-based binder mixtures are most often used in the production of such concretes. The physical and mechanical properties of hardened concrete depend on the composition of the binders. In order to obtain concrete with good thermal insulation and mechanical properties, it is necessary to select the optimal composition of binders.

Lime-based binders used in the research: hydrated (slaked) and calcite quicklime. Mineral additives were also used: metakaolin and opoka. Binders of 8 compositions were investigated. The best performing binder was identified. They are the basis for the fine hemp concrete with 0 ... 4 mm hemp shives research. The density, strength, shrinkage, thermal conductivity of this concrete were determined.

Keywords: concrete, hemp fiber, materials properties.

AUTORIŲ LYDRAŠTIS

Autoriaus vardas, pavardė: Vincas Gurskis

Mokslo laipsnis ir vardas: daktaras, docentas

Darbo vieta ir pozicija: Vytauto Didžiojo universiteto Vandens ūkio ir žemėtvarkos fakulteto Hidrotechninės statybos instituto docentas, VšĮ Kauno technikos kolegijos, Inžinerijos mokslų fakulteto, Statybos inžinerijos krypties studijų programų komiteto docentas.

Autoriaus mokslinių interesų sritys: statybinės medžiagos

Telefonas ir el. pašto adresas: +370 37 752322, vincas.gurskis@vdu.lt; vincas.gurskis@edu.ktk.lt

Autoriaus vardas, pavardė: Dainius Ramukevičius

Mokslo laipsnis ir vardas: magistras

Darbo vietą ir pozicija: VšĮ Kauno technikos kolegijos, Statybos inžinerijos krypties statybos studijų programos lektorius

Autoriaus mokslinių interesų sritys: statybinės medžiagos

Telefonas ir el. pašto adresas: +370 37 752322, dainius.ramukevicius@edu.ktk.lt

Autoriaus vardas, pavardė: Tomas Rakauskas

Mokslo laipsnis ir vardas: bakalauras

Darbo vieta ir pozicija: Vytauto Didžiojo universitetas, vandens ūkio ir žemėtvarkos fakultetas

Autoriaus mokslinių interesų sritys: statybinės medžiagos

Telefonas ir el. pašto adresas: rakauskast@yahoo.com

A COVER LETTER OF AUTHORS

Author name, surname: Vincas Gurskis.

Science degree and name: doctor, associated professor

Workplace and position: Vytautas Magnus University Faculty of Water and Land Management Institute of Hydraulic Engineering; Kaunas University of Applied Engineering Sciences, Faculty of Engineering Sciences, Associated Professor of Civil Engineering Study Field Study Program Committee.

Author's research interests: building materials

Telephone and e-mail address: +370 37 752322, vincas.gurskis@vdu.lt; vincas.gurskis@edu.ktk.lt

Author name, surname: Dainius Ramukevičius

Science degree and name: master degree

Workplace and position: Kaunas Technical College, Lecturer of Civil engineering program of Civil Engineering Study Field

Author's research interests: building materials

Telephone and e-mail address: +370 37 752322, dainius.ramukevicius@edu.ktk.lt

Author name, surname: Tomas Rakauskas

Science degree and name: bachelor

Workplace and position: Vytautas Magnus University, Faculty of Water and Land Management

Author's research interests: building materials

Telephone and e-mail address: rakauskast@yahoo.com

SLĖGINIO UŽDEGIMO VARIKLIO EKOLOGINIŲ RODIKLIŲ TYRIMAS KEIČIANT ĮSIURBIAMO ORO AUŠINIMO INTENSYVUMĄ

Audrius Matulis¹, Alfredas Rimkus^{1,2}

¹Vilniaus technologijų ir dizaino kolegija, ²Vilniaus Gedimino technikos universitetas

Anotacija

Straipsnyje analizuojami automobilio variklio rodiklių gerinimo sprendimai, tobulinant tarpinius oro aušintuvus. Apžvelgti moksliniai tyrimai, kuriuose slėginio uždegimo variklio ekologiniai ir energetiniai rodikliai gerinami keičiant įsiurbiamo oro aušinimo intensyvumą. Aprašomas eksperimentinis tyrimas, kurio metu į slėginio uždegimo variklio įsiurbimo sistemą įmontuotas skysčiu aušinamas tarpinis oro aušintuvas. Aušintuvo efektyvumas buvo keičiamas reguliuojant pratekančio aušinančio skysčio srautą. Temperatūros jutikliais buvo matuojama oro temperatūra prieš jam patenkant į tarpinį oro aušintuvą bei išeinat iš jo. Nustatyti variklio ekologiniai rodikliai (azoto oksidų (NO_x), angliavandenilių (CH) ir anglies dvideginio (CO₂) koncentracijos išmetamosiose dujose bei dūmingumas) varikliui veikiant skirtingomis apkrovomis bei keičiant tarpinio oro aušintuvo intensyvumą ir analizuojamos šių rodiklių pokyčio priežastys.

Reikšminiai žodžiai: Tarpinis oro aušintuvas, slėginis uždegimas, variklio ekologiniai rodikliai.

Įvadas

Energijos vartojimas prisideda prie klimato kaitos, kuri pastaraisiais metais kelia didelį susirūpinimą. Energijos gamyba generuoja ~78 % viso šiltnamio efektą sukeliančių išmetamųjų dujų kiekio ES. Beveik vienas trečdalis šio kiekio išmetama transporto sektoriuje. Šiuo metu transporto priemonėms su vidaus degimo varikliais keliama aukšti aplinkosauginiai reikalavimai. Aplinkos apsaugos ministerijos ataskaita atskleidžia, kad 2016 m. Lietuvoje į atmosferą išmesta 20,1 mln. tonų CO₂ dujų. Daugiausia šių dujų, 57 % išmeta energetikos sektorius, kurio pagrindinis teršalų šaltinis yra transportas – net 48 % (Europos, 2016). Automobiliai – viena svarbiausių ir daugiausia diskusijų sukelianti priežastis, dėl jų neigiamo poveikio gamtai ir žmogui. „Worldometers“ duomenimis lengvųjų automobilių, važiuojančių pasaulio keliais, yra apie 600 milijonų. Kiekvienais metais jų skaičius padidėja vidutiniškai 6,45 %. Prognozuojama, kad 2035 m. automobilių skaičius išaugs iki 3 mlrd. VĮ „Regitra“ duomenimis, 2020 iki kovo 1 d. Lietuvoje buvo registruota 1,5 mln. transporto priemonių, iš kurių net 1034736 (69 %) varomi dyzelinu. Šia degalų rūšimi varoma 90 % šalies autobusų ir 96 % krovinių automobilių bei visa žemės ūkio technika. Plėtodami degalų gamybos technologijas ir tobulindami „žaliosios“ energijos strategiją, mokslininkai atliko nemažai atsinaujinančios energetikos srities tyrimų ir technologinių patobulinimų. Pagrindinis automobilių projektuotojų, konstruktorių ir tyrėjų tikslas – automobilio efektyvumo didinimas. Pagrindiniai uždaviniai – degalų sąnaudų sumažinimas ir tuo pačiu kenksmingų išmetamų dujų kiekio mažinimas. Tyrėjai numato potencialias galimybes automobilio efektyvumui didinti optimizuojant degalų savybes bei variklių ir perdavimo mechanizmų konstrukcijas. Esminė vidaus degimo variklio efektyvumo padidinimo galimybė – variklio cilindų pripildymo gerinimas. Naudojant priverstinį įpūtimą, t.y. padidinant įpučiamo oro masę, galima padidinti variklio galingumą, užtikrinant optimalias degalų sąnaudas. Variklio rodikliams įtakos turi ir pripučiamo oro aušinimo intensyvumas.

Atsižvelgiant į problematiką, **tyrimo tikslas** – atlikus slėginio uždegimo variklio, keičiant įsiurbiamo oro aušinimo intensyvumą, eksperimentinius tyrimus ir nustatyti įsiurbiamo oro aušinimo intensyvumo įtaką variklio ekologiniams rodikliams.

Uždaviniai:

- Apžvelgti mokslinius tyrimus, siekiant slėginio uždegimo variklio ekologinių ir energetinių rodiklių pokyčio, keičiant įsiurbiamo oro aušinimo intensyvumą.
- Atlikti eksperimentinį slėginio uždegimo variklio 1.9 TDI ekologinių rodiklių tyrimą keičiant tiekiamo oro aušinimo intensyvumą.
- Apibendrinti atliktus eksperimentinius tyrimus ir pateikti apibendrintas išvadas.

Variklio rodiklių, tobulinant tarpinio oro aušintuvo veikimą, tyrimų apžvalga

Europos Sąjunga dalyvauja sutelkiant visuotines pastangas sumažinti išmetamą šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekį. ES, siekdama šio tikslo įsipareigojo – iki 2020 metų sumažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijas ne mažiau kaip 20 % (palyginti su 1990 m.), iki 2030 m. – ne mažiau kaip iki 40 % ir iki 2050 – 80–95 %. Tai reiškia, kad iki 2020 m. naujų transporto priemonių parko automobiliai turėjo vidutiniškai išmesti į atmosferą tik 95 g. CO₂/km. (Europa, 2019). Analizuoti moksliniai tyrimai, kuriais

siekama dyzelinių variklių emisijos rodiklių gerinimo, tobulinant tarpinį oro aušintuvą. Mokslininkų atliktų tyrimų tikslumas ir sudėtingumas labai įvairus.

Muqem, M. 2012 m. tyrė tarpinio aušintuvo efektyvumo mažėjimo problemą šalyse, kuriose vasarą oro temperatūra įkaista iki 40 °C. Tyrimams atlikti naudojamas turbokompresorinio dyzelinio variklio tarpinis aušintuvas. Skirtingi temperatūros duomenys buvo užregistruoti skirtingais variklio sūkais per tarpinio aušintuvo įvestį ir išėjimą. Temperatūra dviem jutikliais (termistoriais) matuojama įėjimo ir išleidimo angoje. Termistorių varža kinta priklausomai nuo temperatūros. Šie du jutikliai yra prijungti prie elektroninio temperatūros matavimo prietaiso, kuris nustato oro įleidimo ir išleidimo temperatūrą esant skirtingiems variklio apsisukimų dažniams. Palaiptui buvo didinami variklio apsisukimai, laiko intervalas tarp tyrimų – 5 minutės. Buvo atlikti 6 matavimai 20 °C aplinkos temperatūroje. Gauti rezultatai yra pateikti 1 lentelėje.

1 lentelė.

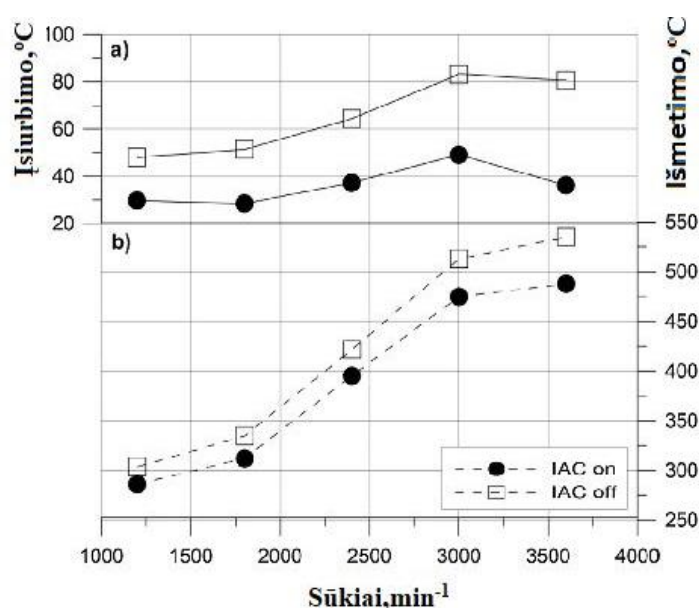
Tyrimų duomenys

Variklio sūčiai n, min^{-1}	Oro temperatūra prieš tarpinį oro aušintuvą, ($T1$) °C	Oro temperatūra tarpinio aušintuvo išėjime, ($T2$) °C	Temperatūros kitimas tarpiniame oro aušintuve, °C
2800	89	45	44
3200	93	55	38
3600	99	68	31
4000	105	77	28
4400	111	86	25
4800	118	99	19

Šaltinis: (Muqem, 2012)

Didinant variklio apsakas, variklio į cilindrą tiekama oro masė didėja 1,43 karto, o kai aušintuvas yra aušinamas, ji padidėja 2,618 kartų. Padidėjus oro kiekiui degiajame mišinyje, padidėja degimo greitis ir gebėjimas kontroliuoti išmetamųjų teršalų kiekį. Papildomas deguonies tiekimas leidžia geriau degti degalams. Oro temperatūrai kylant, tarpinio aušintuvo efektyvumas sumažėja. Antra mokslininko tyrimų išvada – tarpinis aušintuvas veikia efektyviai, kai automobilis važiuoja dideliu greičiu. Mokslininkas teigia, kad automobiliui pradėjus važiuoti, oro temperatūros kritimas prie tarpinio aušintuvo gali būti 40 °C – oro srauto iš turbokompresoriaus arba kompresoriaus yra 90 °C, tarpinis aušintuvas jį sumažina iki 50 °C (Muqem, 2012).

Italijos tyrėjų Battista et al. (2018) tiriamo tarpinio oro aušintuvo įrenginio efektyvumo rezultatai yra pavaizduoti 1 pav., kur akivaizdžiai matomas įsiurbiamo oro ir išmetamųjų deginių temperatūros sumažėjimas. Optimizuotas įsiurbiamo oro aušinimas padidino variklio energetinį efektyvumą iki 4,1 % ir sumažino NO_x išmetimą iki 44 % (9,7 g/kWh). Rezultatai gauti naudojant įprastinius dyzelinius degalus.



1 pav. Įsiurbiamo oro ir išmetamųjų dujų temperatūros priklausomybė nuo variklio sukimosi greičio

Šaltinis: (Battista et al., 2018)

Tiumenės universiteto mokslininkų pagrindinis tyrimo tikslas buvo kuo tiksliau nustatyti, kaip išlaikyti pastovią temperatūrą vidaus degimo variklio įsiurbimo kolektoriuje siekiant taupyti degalus ir nustatyti optimalią galią. Bandymų metu nustatyta, kad kai oro įkaitimo temperatūra įsiurbimo kolektoriuje yra aukštesnė kaip 67°C , cilindro užpildymas sumažėja 3–5 %, kai oras įkaista iki $90\text{--}100^{\circ}\text{C}$ – daugiau nei 8 %, todėl įsiurbiamas oras negali įkaisti daugiau kaip $67\text{--}76^{\circ}\text{C}$. Įkaitimo temperatūra priklauso nuo oro slėgio ir aušintuvo ploto. Remiantis skaičiavimais ir eksperimentais nustatyta, kad siekiant išlaikyti tam tikrą temperatūrą įsiurbimo kolektoriuje ir taupant iki 25–30 % degalų, ekonomiškiausias yra kintamosios galios aušintuvų naudojimas (Karnauchova, 2014).

Italijos mokslininkai Kumar, M., ir Muqem, M. (2013) tyrė suslėgto oro aušintuvo efektyvumo priklausomybę nuo jo konstrukcijos. Naudojant įprastinį tarpinį aušintuvą, oro temperatūra įsiurbimo kolektoriuje svyruoja nuo $70\text{--}80^{\circ}\text{C}$ esant slėgiui nuo 0,99 iki 1,65 bar, ir šiame intervale oro tankis svyruoja nuo $1,0053\text{ kg/m}^3$ iki $1,6281\text{ kg/m}^3$. Tyrimo metu nustatyta, kad maksimalus aktyvios tarpinio aušintuvo zonos tūris yra $0,0131\text{ m}^3$. Maksimalus šilumos atidavimo kiekis proporcingas variklio sukimosi greičiui. Tyrimo metu naudojamas tarpinio aušintuvo skerspjūvio plotas yra $0,25\text{ m}^2$. Tarpinio aušintuvo šerdies matmenys yra tokie: ilgis – 0,5 m, plotis – 0,5 m, aukštis – $0,0524\text{ m}$. Naudojant apskaičiuotus tarpinio aušintuvo šerdies matmenis, įsiurbiamo oro temperatūra pakils 20°C , o slėgis liks nepakitęs. Šiame temperatūros ir slėgio intervale oro tankis bus nuo $1,1769\text{--}1,9614\text{ kg/m}^3$. Tyrimų metu nustatyta, kad naudojant tokių matmenų tarpinį aušintuvą, labai padidėja oro masės srautas variklyje. Padidėjus deguonies srautui, padidėja degimo greitis ir sumažėja išmetamųjų teršalų kiekis, taupomi degalai (Kumar et al., 2013).

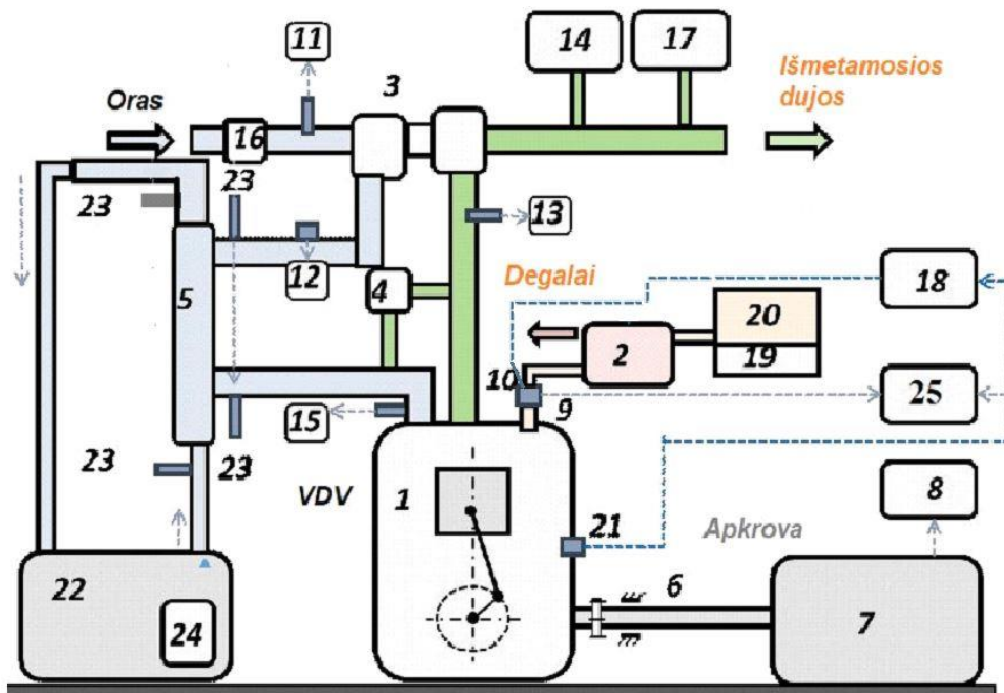
Kosovo Prishtina universiteto mokslininkų Lajqi, N., Doçi, I. ir Lajqi Sh. (2016) tyrimo objektas yra turbokompresorinio dizelinio variklio su tarpiniu oro aušintuvu skaitinis modelis. Variklis suskirstytas į stūmoklių grupę, kompresorių, tarpinį aušintuvą, įsiurbimo kolektorių, turbiną, išmetimo kolektorių. Turbina suka kompresorių, kad suspaustų orą. Suslėgtas oras, aušinamas tarpiniu oro aušintuvu, tiekiamas į įsiurbimo kolektorių, kuris gali išlaikyti tam tikrą slėgį. Degalų ir oro mišinys užsidega, sukurdamas didelį slėgį ir sukuria sukimo momentą. Po degimo išsiskiria išmetamosios dujos iš cilindro, todėl kolektoriaus temperatūra pakyla. Mokslininkų analizuojamas variklis yra atvira termodinaminė sistema. Tyrimų išvadose mokslininkai teigia, kad numatomi procesai, vykstantys vidaus degimo variklyje, gali būti nustatomi labai mažais pokyčiais, kurių neįmanoma atlikti eksperimentiškai dėl matavimo paklaidų. Rezultatai gali būti naudojami reikiamiems parametrams nustatyti. Naudojant šį stendą, galima stebėti tokių parametrų kaitą: įpurškimo kampa, tarpinio aušintuvo efektyvumą, turbokompresoriaus charakteristikas, įsiurbimo ir išmetimo kolektoriaus tūrio pokyčius (skersmens ir ilgio) ir kt.

Eksperimentinių tyrimų metodika

Eksperimentiniai tyrimai atlikti Vilniaus Gedimino technikos universitete, Transporto inžinerijos fakultete, Automobilių transporto katedroje, Vidaus degimo variklių laboratorijoje. Eksperimentiniam tyrimui atlikti naudotas 4 cilindrų, 1896 cm^3 darbinio tūrio TDI (kodas – 1Z) slėginio uždegimo variklis, kurio išvystoma maksimali variklio galia 66 kW esant 4000 min^{-1} , maksimalus sukimo momentas 202 Nm esant 1900 min^{-1} . Eksperimentinių tyrimų stendo schema vaizduojama 2 pav.

Slėginio vidaus degimo variklio tyrimams atlikti naudotas elektrinis variklių bandymų stendas KI-5543 su svarstykliniu dinamometru, vidaus degimo variklio sukuriama sukimo momentui nustatyti. Variklis su stendu sujungtas velenu, kurio abiejuose galuose yra lygių kampinių greičių lankstai. Variklių bandymų stendas yra universalus. Veikiant $600\text{--}1400\text{ min}^{-1}$ sūkais stendas veikia elektros variklio režimu. Šis režimas suteikia galimybę sukurti bandomą variklį ir nustatyti jo vidinius mechaninius nuostolius. Generatoriaus (stabdymo) režimu stendas veikia $1600\text{--}3000\text{ min}^{-1}$ sūkais ir šiame sūkių diapazone vidaus degimo variklis yra apkraunamas. Stendo sukuriama sukimo/stabdymo momentas, veikiant tiek variklio, tiek generatoriaus režimu, reguliuojamas skystiniu reostatu, keičiant elektros srovės stiprį statoriaus apvijose. Tai vykdoma elektromechanine pavara keičiant elektrodų padėtį elektrolite. Apkrovos matavimo paklaida $\pm 1,23\text{ Nm}$. Tyrimų stendas įmontuotas stacionariai ant tvirto betoninio pagrindo ir nuolatos aušinamas aušinimo skysčiu, tiekiamu iš bendros aušinimo sistemos. Elektroninėmis svarstyklėmis SK-5000 ir chronometru nustatytos valandinės degalų sąnaudos, matavimo paklaida 0,5 %. Taip pat kiekvieno bandymo metu fiksuotas slėgis cilindre.

Išmetamųjų dujų analizatoriumi AVL DiCom 4000 fiksuojami šie rodikliai: dūmingumas (absorbicijos koeficientas), kurio matavimo tikslumas $0,01\text{ m}^{-1}$; CO – matavimo tikslumas 0,01 % tūrio; CO₂ – matavimo tikslumas 0,1 % tūrio; O₂ – matavimo tikslumas 0,01 % tūrio; CH – matavimo tikslumas 1 ppm tūrio; NO_x – matavimo tikslumas 1 ppm tūrio.



2 pav. Tyrimų stendo schema:

1 – 1.9 TDI variklis; 2 – aukšto slėgio degalų siurblys; 3 – turbokompresorius; 4 – EGR vožtuvas; 5 – tarpinis oro aušintuvas; 6 – jungiamasis velenas; 7 – variklio apkrova; 8 – variklio apkrovos rodiklis; 9 – degalų įpurškimo pradžios jutiklis; 10 – cilindro slėgio jutiklis; 11 – išsiurbiamo oro temperatūros jutiklis; 12 – suslėgto oro slėgio jutiklis; 13 – išmetamųjų temperatūros jutiklis; 14 – dūmomatis; 15 – išsiurbiamųjų dujų temperatūros jutiklis; 16 – oro masės matuoklis; 17 – išmetamųjų dujų analizatorius; 18 – cilindro slėgio fiksavimo įranga; 19 – degalų svarstyklės; 20 – degalų talpa; 21 – alkūninio veleno padėties jutiklis; 22 – aušinimo skysčio talpa; 23 – „K-tipo“ termopora; 24 – aušinimo skysčio siurblys; 25 – degalų įpurškimo momento kontrolės įranga.

Šaltinis: sudaryta autorių

Eksperimentinių tyrimų laboratorija ir įrangos išdėstymas vaizduojama 3(a) pav. Skysčiu aušinamo tarpinio oro aušintuvo prijungimas prie bendros variklio aušinimo sistemos parodytas 3(b) pav.



3 pav. Eksperimentinių tyrimų laboratorinė įranga

Šaltinis: sudaryta autorių

Variklio oro tikrinimo sistemoje sumontuotas automobilio SUBARU IMPREZA 2.0T tarpinis oro aušintuvas (4 pav.). Eksperimentinio tyrimo metu keičiamas tarpinio oro aušintuvo aušinimo intensyvumas t.y. keičiamas aušinimo skysčio (vandens) tekėjimo per aušintuvą debitas. „K-tipo“ termopromis matuojama T_1 (°C) – oro temperatūra prieš tarpinį oro aušintuvą, T_2 (°C) – oro temperatūra už tarpinio oro aušintuvo,

T_3 ($^{\circ}\text{C}$) – vandens temperatūra prieš tarpinį oro aušintuvą, T_4 ($^{\circ}\text{C}$) – vandens temperatūra už tarpinio oro aušintuvo. Temperatūros matavimo tikslumas ± 1.5 $^{\circ}\text{C}$.



4 pav. SUBARU IMPREZA 2.0T tarpinis oro aušintuvus

Šaltinis: sudaryta autorių

Bandymas Nr. 1 – tarpinio oro aušintuvo efektyvumas 0 %. Prieš atliekant bandymą skysčio cirkuliavimas per tarpinį oro aušintuvą skysčio sklendės buvo uždarytas, kad neaušintų turbokompresoriaus suslėgto ir įkaitinto į variklį pratekančio oro. Prieš tarpinį oro aušintuvą ir už jo sumontuotos „K-tipo“ termoporos fiksavo įtekančio ir ištekančio suslėgto oro temperatūrą. Duomenys fiksuoti esant įjungtai bei išjungtai deginių recirkuliacijai (EGR) ir varikliui veikiant 2000 min^{-1} bei esant trims skirtingoms apkrovoms: 90 Nm, 60 Nm ir 30 Nm.

Bandymas Nr. 2 – tarpinio oro aušintuvo efektyvumas 50 %. Prieš atliekant bandymą skysčio cirkuliavimas per tarpinį oro aušintuvą atidarytas ~ 50 %, kad dalinai aušintų pratekančią orą. „K-tipo“ termoporos fiksavo į aušintuvą įtekančio ir ištekančio aušinimo skysčio bei oro temperatūrą. Duomenys fiksuojami varikliui veikiant tais pačiais režimais kaip ir pirmo bandymo metu.

Bandymas Nr. 3 – tarpinio oro aušintuvo efektyvumas 100 %. Prieš atliekant bandymą skysčio cirkuliavimas per tarpinį oro aušintuvą atidaromas 100 %, kad tarpinis oro aušintuvus maksimaliai aušintų į variklį pratekančią orą. „K-tipo“ termoporos fiksavo į aušintuvą įtekančio ir ištekančio aušinimo skysčio bei oro temperatūrą. Duomenys fiksuojami varikliui veikiant tais pačiais režimais kaip ir pirmo bei antro bandymų metu.

Kiekvienas bandymas pakartotas tris kartus ir rezultatuose pateiktas rezultatų vidurkis. Variklio 1Z rodiklių matavimai atlikti priverstinai vėdinamoje laboratorijos patalpoje, palaikant pastovią įsiurbiamo oro temperatūrą. Visi bandymai atlikti tą pačią dieną, oro slėgis tą dieną kito minimaliai, taigi bandymų rezultatams svarbios įtakos neturėjo.

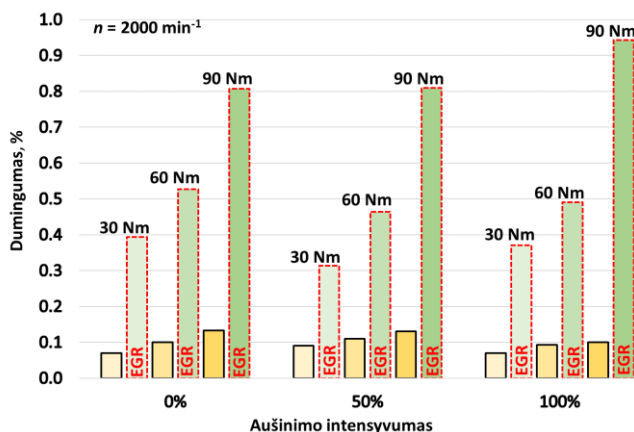
Tyrimų rezultatai ir jų analizė

Variklio ekologinių rodiklių pokytis, keičiant įsiurbiamo oro aušinimo intensyvumą esant įvairioms apkrovoms bei išjungus bei įjungus EGR pateiktas 5, 6, 7 ir 8 paveikslėliuose. Tarpinio oro aušintuve esant maksimaliam aušinimui oro temperatūra priklausomai nuo apkrovos sumažėjo 28 $^{\circ}\text{C}$ – 38 $^{\circ}\text{C}$. Matuojant temperatūrą įsiurbimo kolektoriuje, didinant tarpinio oro aušintuvo intensyvumą temperatūrų pokyčiai buvo mažesni. Į variklį įsiurbiamo oro temperatūrų pokytis, nenaudojant EGR, esant 30 Nm variklio apkrovai buvo 18 $^{\circ}\text{C}$, esant 60 Nm apkrovai buvo 15 $^{\circ}\text{C}$, esant 90 Nm apkrovai buvo 10 $^{\circ}\text{C}$. Temperatūros sumažėjimas gerina cilindų pripildymą tankesniu oru. Panašūs temperatūros pokyčiai gauti ir su atidarytu EGR vožtuvu.

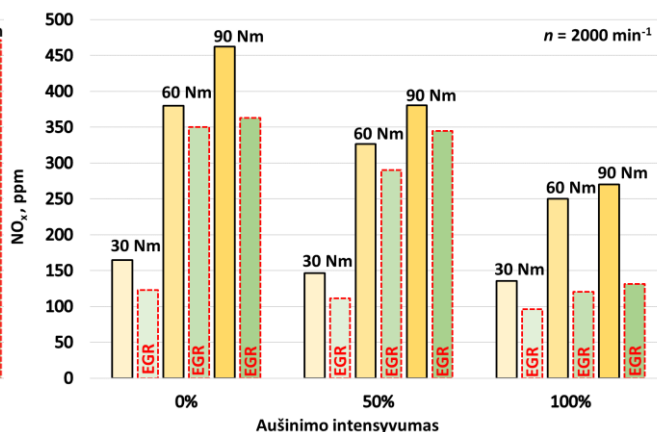
Didinant variklio apkrovą dūmingumas auga dėl mažėjančio oro pertekliaus koeficiento. EGR ženkliai padidina dūmingumą, nes į cilindą sugrąžinti deginiai, kuriuose maža deguonies koncentracija taip pat sumažina oro perteklių, slopina degimą ir mažina degimo temperatūrą. Varikliui veikiant be EGR ir tarpiniame aušintuve didinant oro aušinimo intensyvumą dūmingumas sumažėjo nuo 0,14 % iki 0,1 % (santykinai ~ 28 %) nes didėja oro tankis, įsiurbiamas daugiau oro ir išauga oro perteklius (5 pav.). Tačiau varikliui veikiant su EGR sistema ir tarpinį oro aušinimo intensyvumą padidinus iki 100 % esant didesnėms apkrovoms dūmingumas turi tendenciją didėti, nes kartu su EGR tarpinis oro aušinimas sumažina degimo temperatūrą. Esant variklio apkrovai 90 Nm, dūmingumas išauga nuo 0,8 % iki 0,95 % (santykinai ~ 19 %).

Azoto oksidų (NO_x) susidarymas tiesiogiai priklauso nuo temperatūros variklio cilindre ir oro pertekliaus. Azoto oksidai, įskaitant azoto monoksidą (NO) ir azoto dvideginį (NO_2), susidaro tuomet, jei temperatūra degimo kameroje viršija maždaug 1390 $^{\circ}\text{C}$. Taip vyksta, kai variklis dirba apkrautas. Azoto oksidai, kylant temperatūrai labiau formuojasi, tad norint juos sumažinti reikia mažinti temperatūrą degimo kameroje. Atliekant bandymą, nenaudojant EGR, kai aušinimo skysčio cirkuliavimas per tarpinį oro aušintuvą atidaromas 100 %, esant variklio apkrovai 90 Nm, azoto oksidų koncentracija sumažėja nuo 460 ppm iki 270 ppm (santykinai ~ 41 %). Kai skysčio cirkuliavimas per tarpinį oro aušintuvą atidaromas 100 %, esant tai pačiai variklio apkrovai 90 Nm ir esant atidarytam EGR, azoto oksidų koncentracija sumažėja nuo 360 ppm

iki 140 ppm (santykinai ~61 %) o palyginus su atveju be EGR ir aušinimo NO_x santykinai sumažėja ~70 % (6 pav.). Tai vyksta dėl to, kad į cilindrą patenka išmetamųjų dujų dalis, kuri sumažina įsiurbiamo oro kiekį ir krenta degimo temperatūra cilindre bei temperatūra cilindre sumažėja ir dėl šaltesnio įsiurbiamo oro.

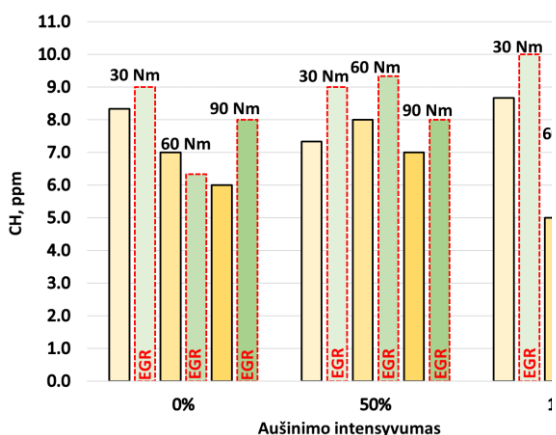


5 pav. Tiriamo variklio dūmingumo pokytis
Šaltinis: sudaryta autorių

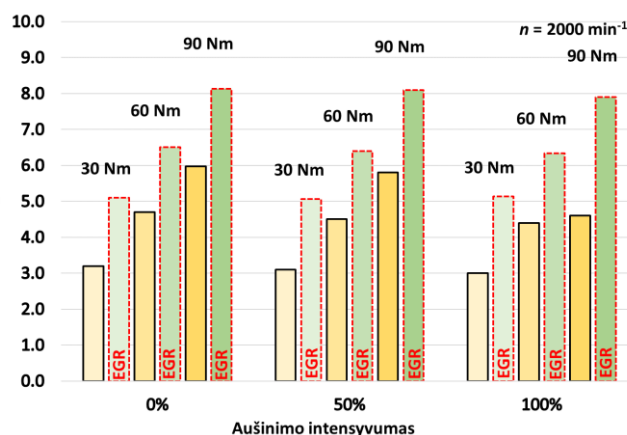


6 pav. Azoto oksidų koncentracijos pokytis
Šaltinis: sudaryta autorių

Angliavandenilių (CH) koncentracija išmetamosiose dujose rodo nepilno degimo produktų emisiją. Bandymu nustatyta, kad didinant variklio apkrovimą CH mažėja ir tai lemia geresnis degimas išaugusioje degimo temperatūroje. EGR didina angliavandenilių koncentraciją nes sumažėjus degimo temperatūrai degimo procesas blogėja (žr. 7 pav.), tačiau galima teigti, kad CH koncentracija visuose tirtuose režimuose yra maža ir neviršija 10 ppm. Padidinus tarpinį įsiurbiamo oro aušinimą iki 100 %, ir naudojant EGR, CH koncentracijos sumažėjimas nepastebėtas, nes tarpinis oro aušinimas kartu su EGR ženkliai mažina degimo temperatūrą.



7 pav. Angliavandenilių koncentracija išmetamosiose dujose
Šaltinis: sudaryta autorių



8 pav. Anglies dvideginio koncentracija
Šaltinis: sudaryta autorių

Nors varikliui veikiant be EGR ir esant didesnėms apkrovoms (60 Nm ir 90 Nm), CH koncentracija sumažėja nuo 7 ppm iki 5 ppm ir nuo 6 ppm iki 4 ppm (santykinai ~30 %), nes esant tarpiniam oro aušinimui pagerėjo cilindrų pripildymas ir išaugus oro pertekliui pagerėjo degimas.

Didinant variklio apkrovimą anglies dvideginio (CO_2) koncentracija auga, nes degiamame mišinyje didėja degalų koncentracija (žr. 9 pav.). Sunaudotų degalų kiekis tiesiogiai įtakoja CO_2 emisiją. EGR ženkliai didina CO_2 koncentraciją nes dalis į cilindrą įsiurbiamo oro pakeičiama deginiais, kuriuose daug CO_2 dujų bei EGR nors ir neženkliai bet didina degalų sąnaudas. Tarpinis oro aušinimas laidžia neženkliai sumažinti CO_2 koncentraciją varikliui veikiant be EGR ir su EGR nes padidina cilindrų pripildymą oru (išmetamosiose dujose sumažėja CO_2 dalis) bei neženkliai mažina degalų sąnaudas. Esant variklio apkrovai 90 Nm, nenaudojant EGR, ir tarpinio oro aušintuvo aušinimą intensyvinant nuo 0 % iki 100 %, bandymų metu gautas anglies dvideginio koncentracijos sumažėjimas nuo 6 % iki 4,7 %, t.y. CO_2 koncentracija santykinai sumažėjo ~21 %.

Išvados

Analizuojant mokslinius tyrimus daroma išvada, kad tobulinant tarpinio oro aušintuvo techninius sprendimus, keičiamas cilindų pripildymas oru bei oro temperatūra ir tai lemia variklio energetinius ir ekologinius parametrus, tačiau nėra išsamios informacijos apie ekologinių ir energetinių variklio rodiklių pokyčius, pritaikius reguliuojamo intensyvumo skysčiu aušinamą tarpinį oro aušintuvą varikliui veikiant su EGR sistema ir nenaudojant EGR.

Atlikus slėginio uždegimo variklio 1.9 TDI ekologinių ir energetinių rodiklių eksperimentinius tyrimus esant skirtingoms variklio apkrovoms, keičiant tarpinio oro aušintuvo aušinimo intensyvumą ir EGR veikimą, gauti apibendrinti rezultatai:

- Eksperimentinių tyrimų metu, esant maksimaliam aušinimui oro temperatūra aušintuve priklausomai nuo apkrovos sumažėjo 28 °C – 38 °C, įsiurbimo kolektoriuje sumažėjo 10 °C – 18 °C.
- Varikliui veikiant be EGR tarpinis oro aušinimas gali pagerinti degimą ir sumažinti dūmingumą iki 28 %, tačiau funkcionuojant EGR dūmingumas gali išaugti 19 %, nes ženkliai krenta degimo temperatūra.
- Tarpinio oro aušintuvo aušinimo 100 % intensyvumas sumažina azoto oksidų koncentraciją išmetamosiose dujose nenaudojant EGR ~40 %, naudojant EGR – ~60%, nes dėl šaltesnio įsiurbiamo oro krenta degimo temperatūra.
- Aušinant įsiurbiamą orą nesudegusių angliavandenilių koncentraciją santykinai sumažėja ~30 % tik varikliui veikiant be EGR. Naudojant EGR teigiamas efektas beveik nepastebimas dėl blogesnio degimo ženkliau sumažėjus degimo temperatūrai.
- Tarpinis oro aušinimas anglies dvideginio koncentraciją sumažina iki 21 % nes padidina cilindų pripildymą oru (išmetamosiose dujose sumažėja CO₂ dalis) bei neženkliai mažina degalų sąnaudas. Naudojant EGR anglies dvideginio koncentracija pakinta nedaug.

Literatūra

1. Battista, D., Bartolomeo, M., Cipollone, R. Flow and thermal management of engine intake air for fuel and emissions saving. *Energy Conversion and Management*, 173. 2018. P. 46–55.
2. Europos Audito Rūmai. ES išmetamas šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekis. 2019, <https://op.europa.eu/lt/publication-detail/-/publication/e9e5a8cd-367f-11ea-ba6e-01aa75ed71a1/language-lt>
3. Kumar, M., Muqem, M. Design of an intercooler of a turbocharger unit to enhance the volumetric efficiency of diesel engine. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, Vol. 4, Issue 3. 2013. P. 01-10.
4. Карнаухова В. Н. Оптимизация мощности нагревательного элемента для поддержания оптимальной температуры воздуха во впускном коллекторе ДВС. *Современные проблемы науки и образования*, № 3. 2014.
5. Lajqi, N., Doc, I.I., Lajqi, Sh. Modelling and Simulation of the Turbocharged Diesel Engine with Intercooler. *IFAC-PapersOnLine* 49-29, 2016. P. 237–242.
6. Lietuvos Respublikos Vyriausybės įsakymas Nr. 591/640 Dėl aplinkos oro užterštumo normų nustatymo. Vilnius: Valstybės žinios, 2001, http://www3.lrs.lt/pls/inter2/dokpaieska.showdoc_l?p_id=156726
7. Muqem, M. Turbocharging With Air Conditioner Assisted Intercooler. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, Volume 2, Issue 3. 2012., P. 38-44.

RESEARCH OF COMPRESSION IGNITION ENGINE ECOLOGY PARAMETERS BY CHANGING THE INTENSITY OF AIR INTERCOOLER

Annotation

This article analyzes solutions which help to improve car engine performance when upgrading intercooler. It includes reviews of some scientific researches about improving the ecological and energy performance of the compression-ignition engine by changing the cooling intensity of absorbed air. Mainly article sets out an experimental study when a fluid-cooled intercooler was installed into a compression-ignition engine system. The efficiency of the intercooler was changed when regulating the flow of the cooling fluid. Temperature sensors measured the air temperature before it entered and exited the intercooler. Ecological parameters of the engine (nitrogen oxides, hydrocarbons, carbon dioxide concentration in the exhaust gas, and smoke intensity) were determined when working on different loads and with different air cooling intensity and reasons of the changes in these parameters are analyzed here.

Straipsnyje analizuojami automobilio variklio rodiklių gerinimo sprendimai, tobulinant tarpinius oro aušintuvus. Apžvelgti moksliniai tyrimai, kuriuose slėginio uždegimo variklio ekologiniai ir energetiniai rodikliai gerinami keičiant įsiurbiamo oro aušinimo intensyvumą. Aprašomas eksperimentinis tyrimas, kurio metu į slėginio uždegimo variklio įsiurbimo sistemą įmontuotas skysčiu aušinamas tarpinis oro aušintuvas. Aušintuvo efektyvumas buvo keičiamas reguliuojant pratekančio aušinančio skysčio srautą. Temperatūros jutikliais buvo matuojama oro temperatūra prieš jam patenkant į tarpinį oro aušintuvą bei išeinat iš jo. Nustatyti variklio ekologiniai rodikliai (azoto oksidų (NO_x), angliavandenilių (CH) ir anglies dvideginio (CO₂) koncentracijos išmetamosiose dujose bei dūmingumas) varikliui

veikiant skirtingomis apkrovomis bei keičiant tarpinio oro aušintuvo intensyvumą ir analizuojamos šių rodiklių pokyčio priežastys.

Key words: Intecooler, compression ignition, engine ecological performance

AUTORIŲ LYDRAŠTIS

Autoriaus vardas, pavardė: Audrius Matulis.

Mokslo laipsnis ir vardas: magistras, asistentas.

Darbo vieta ir pozicija: VšĮ Vilniaus technologijų ir dizaino kolegijos, Automobilių transporto inžinerijos katedros asistentas.

Autoriaus mokslinių interesų sritys: Transporto priemonės, vidaus degimo varikliai, transporto ekologija.

Telefonas ir el. pašto adresas: +370 67385892, a.matulis@vtdko.lt

Autoriaus vardas, pavardė: Alfredas Rimkus.

Mokslo laipsnis ir vardas: daktaras, docentas.

Darbo vieta ir pozicija: VšĮ Vilniaus technologijų ir dizaino kolegijos, Automobilių transporto inžinerijos katedros docentas. VšĮ Vilniaus Gedimino technikos universiteto, Automobilių inžinerijos katedros docentas.

Autoriaus mokslinių interesų sritys: Transporto priemonės, vidaus degimo varikliai, transporto ekologija, alternatyvioji energetika.

Telefonas ir el. pašto adresas: +370 61571161, a.rimkus@vtdko.lt, alfredas.rimkus@vgtu.lt

A COVER LETTER OF AUTHORS

Author name, surname: Audrius Matulis.

Science degree and name: master degree.

Workplace and position: Vilnius Technology and Design College, Automobile Transport Engineering department assistant.

Author's research interests: Vehicles, internal combustion engines, transport ecology.

Telephone and e-mail address: +370 67385892, a.matulis@vtdko.lt

Author name, surname: Alfredas Rimkus.

Science degree and name: associated professor.

Workplace and position: Vilnius Technology and Design College, Automobile Transport Engineering department associated professor. Vilnius Gediminas Technical University, Automobile Engineering department associated professor.

Author's research interests: Vehicles, internal combustion engines, transport ecology, alternative energy.

Telephone and e-mail address: +370 61571161, a.rimkus@vtdko.lt, alfredas.rimkus@vgtu.lt

DYZELINIŲ IR BENZININIŲ AUTOMOBILIŲ DEGALŲ SAŃAUDŲ IR CO₂ EMISIJOS LYGINAMASIS TYRIMAS

Alfredas Rimkus

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

Anotacija

Straipsnyje pristatomas panašių techninių charakteristikų dyzelinio ir benzininio automobilių eksploatacinių rodiklių tyrimas. Tyrimas atliktas naudojant automobilio apkrovos stendą, kurio pagalba imituojamas automobilio važiavimas 50 km/h; 90 km/h ir 120 km/h greičiu esant sunkesnėms ir lengvesnėms važiavimo sąlygoms. Esant lengvesnėms važiavimo sąlygoms veikė dyzelinio automobilio kietųjų dalelių filtro regeneracija. Eksperimentinio tyrimo metu nustatytos dyzelinio ir benzininio automobilių degalų sąnaudos, įvertintas jų skirtumas. Įvertinus variklių išmetamųjų dujų kiekį bei anglies dvideginio (CO₂) koncentraciją apskaičiuota lyginamoji CO₂ emisija. Atlikta dyzelinių ir benzininių automobilių anglies dvideginio emisijos rodiklių pokyčio analizė.

Reikšminiai žodžiai: degalų sąnaudos, dyzelinas, benzinai, anglies dvideginis

Įvadas

Nuolatinis pasaulio ekonomikos augimas yra tiesioginio nuolat didėjančio iškastinio kuro (naftos, dujų) vartojimo priežastis, didinanti planetos klimato atšilimą ir galimą negrįžtamą natūralaus sunaikinimo poveikį. Dėl aktyvios žmonijos inžinerinės veiklos, CO₂ koncentracija Žemės atmosferoje padidėjo 1,48 karto: nuo 280 ppm 1750 m. iki 415 ppm 2019 m. ir dramatiškai padidėjusios stichinės nelaimės, tokios kaip ilgalaikės liūtys, didžiuliai potvyniai, uraganai ir kt. 2015 m. bendra pasaulinė CO₂ emisija buvo 32,3 Gt, o transporto sektoriui priskiriama 7,8 Gt (World Energy Investment, 2017).

Griežtėjantys aplinkosauginiai standartai verčia automobilių gamintojus imtis taršos prevencijos priemonių (Burr and Gregory, 2011). Tokių priemonių taikymas leidžia transporto priemonėms pasiekti geresnius išmetamųjų dujų rodiklius (Dobrzyńska et al., 2020), kas savo ruožtu leidžia skatinti mažos taršos transporto naudojimą (Turkensteen, 2017). Tokio transporto perspektyvos jau yra perkeltos į ES ir nacionalinę teisę (Kniūkšta, 2017). Pagal Baltosios transporto knygos reikalavimus transporto priemonės turi būti ekologiškos, o metams bėgant (iki 2050 m.) tradicinių (dyzelinių ir benzininių) transporto priemonių neturi likti (Jakubauskas, 2011). Siekiant gerinti miestų ekologinę situaciją automobilių gamintojai naudoja selektyvinius katalitinius neutralizatorius (SCR) (Solaimuthu et al., 2015), ekologiškus degalus (atitinkančius Pasaulinės degalų chartijos (WWFC) reikalavimus) (Bae and Kim, 2017), kuriuose yra mažiau anglies bei kietųjų dalelių filtrus (KDF) (Pechout et al., 2019).

Tokie sprendimai ateityje leistų užtikrinti gerus išmetamųjų dujų taršumo reikalavimus, bet iš esmės neatspindi dabartinės situacijos. Vidutinis automobilių amžius Lietuvoje (pagal 2018 m. Regitros duomenis) siekė 14,4 metų kas savo ruožtu lėmė ir esamą taršos situaciją Lietuvoje (Valstybės įmonė REGITRA, 2020). Tokie automobiliai atitinka EURO 3 ar EURO 4 taršos reikalavimus (Cleophas et al., 2019, p. 3), bet eksploatacijos metu automobilis gali neatitikti deklaruotų EURO taršos standartų dėl sistemų nusidėvėjimo (Aghbashlo et al., 2015), nekokybiškų degalų naudojimo (Armas et al., 2013) automobilių eksploatacijos nurodymų nesilaikymo (Bereczky, 2017) ir t.t.

Labai svarbu apibrėžti realias priemones, kurios leidžia technologiškai užtikrinti išmetamųjų dujų taršos mažėjimo tendencijas, pvz. SCR leidžia sumažinti CO, CH ir NO_x (Bereczky, 2017), EGR sistema – NO_x (Yamada et al., 2011), o KDF filtrai kietųjų dalelių emisijas (Galindo et al., 2020). Lietuvos atveju ypač svarbios kietųjų dalelių emisijos, kurios ne tik daro žalą žmonių sveikatai (Kinney, 2018), bet ir sukelia smogą miestuose, kas yra ryškiausiai pastebima šaltuoju metų laikotarpiu (Bogacki and Bzdziuch, 2019).

Naujų keleivinių automobilių (2020 m.) vidutinė CO₂ emisija numatyta 95 g/km ir tai 40 % mažiau nei vidutinė CO₂ emisija buvo 2007 m. arba 19 % mažiau nei vidutiniškai 2012 m. (Mock, 2014). Tačiau automobilyje funkcionuojančios išmetamųjų teršalų neutralizavimo sistemos negali sumažinti šiltnamio efektą sukeliančių CO₂ dujų emisiją. Šiltnamio efektą sukeliančių dujų galima mažinti mažinant iškastinių degalų sunaudojimą arba naudojant degalus, kurių sudėtyje yra mažiau anglies (Acar and Dincer, 2019).

Darbo tikslas – atlikti panašių techninių parametrų (svorio, galios) naujų dyzelinio ir benzininio automobilių degalų sąnaudų ir CO₂ dujų emisijų lyginamąjį tyrimą.

Eksperimentinių tyrimų metodika

UAB „Fabula ir partneriai“ užsakytas „Dyzelinių ir benzininių automobilių išmetamųjų dujų emisijų lyginamasis tyrimas“ atliktas VGTU Transporto inžinerijos fakulteto Transporto inžinerijos ir logistikos laboratorijoje

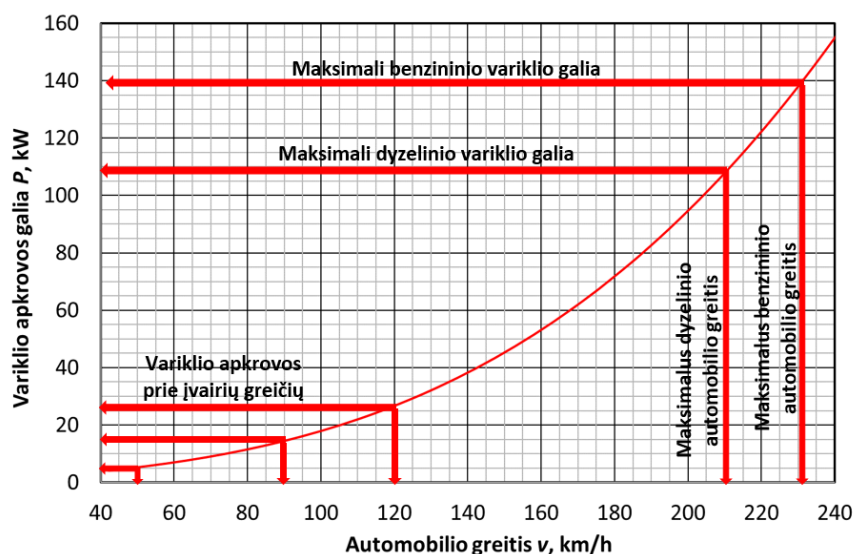
Užsakovas tyrimams pateikė:

- Dyzelinu varomą automobilį „VW Passat PA Variant“ 2018 metų gamybos. Automobilio pagrindiniai techniniai rodikliai pateikti 1 lentelėje.
- Benzinu varomą automobilį „VW Passat PA Limo“ 2018 metų gamybos. Automobilio pagrindiniai techniniai rodikliai pateikti 1 lentelėje.

1 lentelė

Rodikliai	Automobilio tipas	
	dyzelinis	benzininis
Variklis	2.0 TDI SCR	2.0 TSI OPF
Variklio maksimali galia	110 kW	140 kW
Maksimalus sukimo momentas	360 Nm	320 Nm
Transmisija	DSG-7	DSG-7
Greitėjimas (0 - 100 km/h)	9,1 s	7,7 s
Maksimalus greitis	210 km/h	232 km/h
Degalų sąnaudos Low	6,5 l/100 km	11,5 l/100 km
Degalų sąnaudos Medium	5,4 l/100 km	7,9 l/100 km
Degalų sąnaudos High	4,7 l/100 km	6,6 l/100 km
Degalų sąnaudos Extra high	5,5 l/100 km	7,2 l/100 km
Degalų sąnaudos Combined	5,3 l/100 km	7,7 l/100 km
CO ₂ emisija (kombinuota)	140 g/km	175 g/km
Automobilio masė	1600 kg	1530 kg
Automobilio plotis	1,832 m	1,832 m
Automobilio aukštis	1,516 m	1,516 m
Registracija	2019 m	2019 m

Šaltinis: sudaryta autorių



1 pav. Automobilio variklio apkrova (reikalinga galia) tolygiai važiuojant įvairiais greičiais lygiu asfaltu

Šaltinis: sudaryta autorių

Bandymų metu imituojamos realios automobilio važiavimo sąlygos. Automobilui važiuojant keliu, variklio išvystoma galia naudojama įveikti riedėjimo pasipriešinimą, oro pasipriešinimą ir galios nuostolius automobilio transmisijoje. 1 paveiksle pateikiami skaičiavimo rezultatai, kurie apytiksliai parodo, kokią galią turi išvystyti įvairiais greičiais važiuojančio bandomo lengvojo automobilio variklis (automobilio masė 1700 kg, oro aptakumo koeficientas 0,3) tolygiai važiuodamas lygiu keliu, švari ir sausu asfaltu. Skaičiavimų tikrumą realiems bandymams patvirtina tai, kad automobilis, turintis 110 kW galios variklį gali išvystyti ~210 km/h greitį (analogiškai bandomam benzininiam automobiliui), o turintis 140 kW galios variklį gali išvystyti ~230 km/h greitį (analogiškai bandomam dyzeliniam automobiliui).

Atlikti tyrimai dyzelinu ir benzinu varomiems automobiliams važiuojant trimis skirtingais greičiais (50 km/h; 90 km/h ir 120 km/h) ir variklį apkraunant skirtingomis apkrovomis. 1 bandymų serijoje

automobilių varikliai veikė apkrauti didesnėmis apkrovomis ir padidintais sūkiiais (sunkesnių važiavimo sąlygų režimas), 2 bandymų serijoje variklių apkrovos buvo sumažintos, o sūkiiai priklausė nuo pavarų dėžės valdymo algoritmo. Bandymų metu naudotos automobilio variklio apkrovos pateiktos 2 lentelėje.

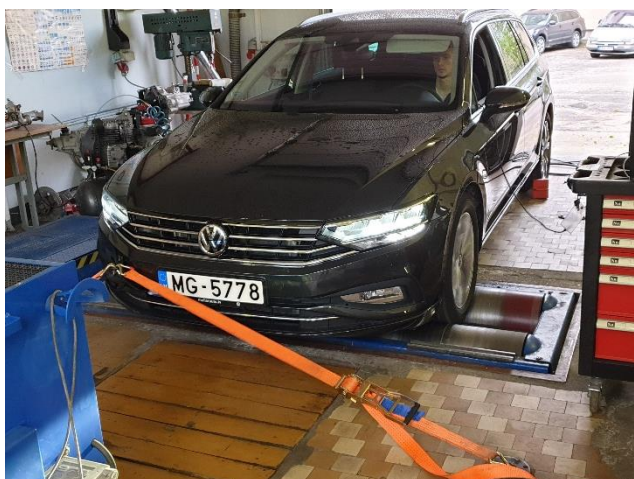
2 lentelė.

Automobilių bandymo režimai ir žymėjimai

Rodikliai	Automobilio tipas											
	dyzelinis						benzininis					
Greitis, km/h	50		90		120		50		90		120	
Galios poreikis važiuojant tolygiai, kW	~6		~15		~27		~6		~15		~27	
Variklio apkrova, kW	18	13	32	24	49	44	18	13	32	24	49	44
Transmisijos pavara	D4	D5	D4	D7	D5	D7	D4	D5	D4	D7	D5	D7
Variklio sukimosi dažnis, min ⁻¹	1636	1272	2915	1397	2953	1832	1683	1301	3002	1552	3041	2032
Bandymo žymėjimas grafikuose	D_1	D_2	D_1	D_2	D_1	D_2	B_1	B_2	B_1	B_2	B_1	B_2

Šaltinis: sudaryta autorių

Transporto inžinerijos ir logistikos laboratorijoje dyzelinu varomo automobilio „VW Passat PA Variant“ (2 pav.) ir benziniu varomo automobilio „VW Passat PA Limo“ (3 pav.) rodiklių matavimai atlikti ritiniu traukos išbandymo stendu MAHA LPS 3000 (4 pav.). Traukos stendo pagrindiniai techniniai duomenys pateikti 3 lentelėje. Automobilų išmetamųjų dujų sudėtis nustatyta naudojant deginių analizatorių AVL DiCom 4000 (4 lentelė).



2 pav. Dyzelinio automobilio bandymas
Šaltinis: sudaryta autorių



3 pav. Benzininio automobilio bandymas
Šaltinis: sudaryta autorių

3 lentelė

Automobilio traukos stendo techniniai duomenys	
Irenginys	Automobilio traukos stendas MAHA LPS 3000
Rodiklis	
Apkrovos įrenginys	Elektromagnetinis sukurinių srovių stabdys
Maksimali apkrova	6 kN (traukos jėga)
Didžiausia stendo stabdymo galia	260 kW
Matavimo paklaida	±2 % nuo išmatuotos reikšmės

Šaltinis: sudaryta autorių

4 lentelė

Deginių analizatoriaus techniniai duomenys		
Aprašymas	Matavimo ribos	Skalės paklaida
CO	0 – 10 % vol.	0,01 % vol.
CO ₂	0 – 20 % vol.	0,1 % vol.
CH	0 – 20000 ppm vol.	1 ppm
NO _x	0 – 5000 ppm vol.	1 ppm
λ	0 – 9,999	0,001

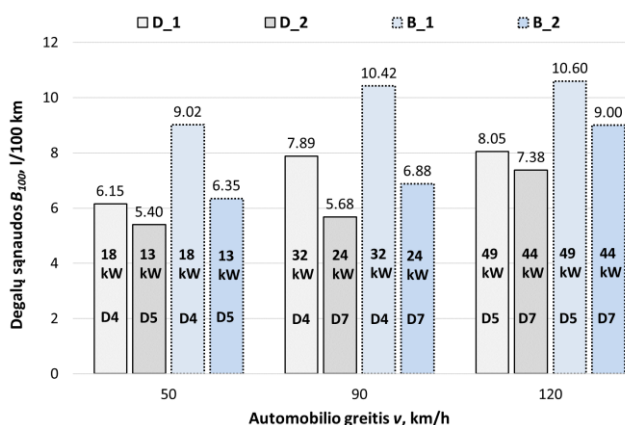
Šaltinis: sudaryta autorių

Variklio degalų ir oro sąnaudos nustatytos naudojant VCDC diagnostine programa gautus duomenis iš variklio valdymo bloko. Bendra išmetamųjų dujų emisija (kg/h) apskaičiuota naudojantis masės tvermės dėsniu – sumuojant įsiurbiamo oro ir įpurškiamų degalų mases (kg/h). CO₂ emisija (g/kWh) nustatyta įvertinus bendrą išmetamųjų dujų emisiją (g/kWh) ir CO₂ koncentraciją (%) išmetamosiose dujose bei dujų molines mases ir variklio išvystomą galią (Heseding and Daskalopoulos, 2006).

Tyrimų rezultatai ir jų analizė

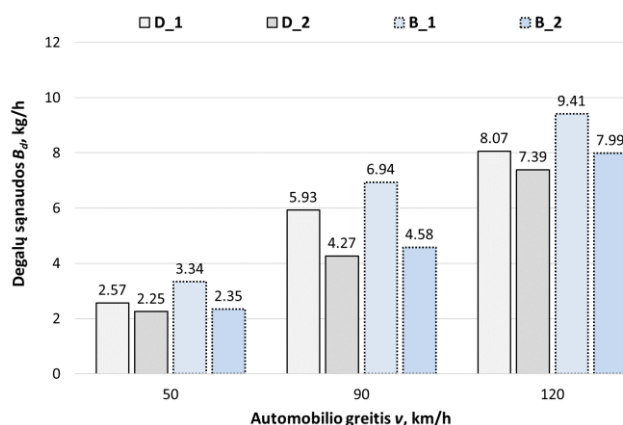
1 bandymu nustatyta, kad dyzelino sąnaudos (l/100 km) prie skirtingų greičių (50 km/h, 90 km/h ir 120 km/h) yra atitinkamai 31 %, 24 % ir 24 % mažesnės, lyginant su benzino sąnaudomis. 2 bandymo dyzelino sąnaudos yra atitinkamai 15 %, 17 % ir 18 % mažesnės, lyginant su benzino sąnaudomis (4 pav.). Tikėtina, kad 2 bandymų serijos metu skirtumas tarp dyzelino ir benzino sąnaudų sumažėjo, nes dyzeliniame automobilyje vyko KD filtro regeneracija, kuriai reikalingas papildomas degalų kiekis.

Variklio valandinės degalų masės sąnaudas (kg/h) įtakoja ne tik degalų sąnaudos 100 km ridos, bet ir automobilio greitis bei degalų tankis. 1 bandymu nustatyta, kad dyzelino sąnaudos (kg/h) prie skirtingų greičių (50 km/h, 90 km/h ir 120 km/h) yra atitinkamai 23 %, 15 % ir 14 % mažesnės, lyginant su benzino sąnaudomis. 2 bandymo dyzelino sąnaudos (kg/h) yra atitinkamai 4 %, 7 % ir 8 % mažesnės už benzino sąnaudas (5 pav.).



4 pav. Variklio degalų sąnaudos (l/100 km) kintant automobilio greičiui ir apkrovai

Šaltinis: sudaryta autorių

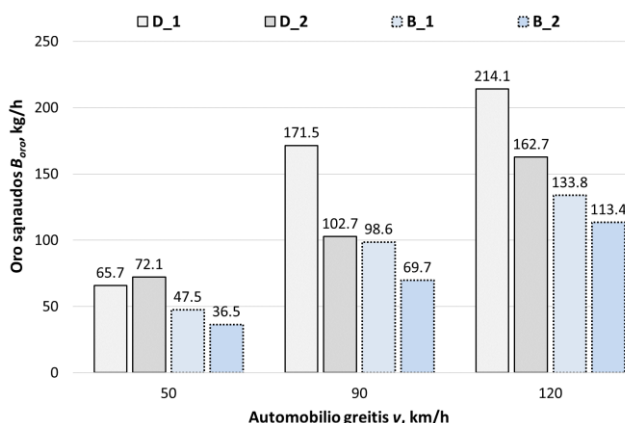


5 pav. Variklio degalų sąnaudos (kg/h) kintant automobilio greičiui ir apkrovai

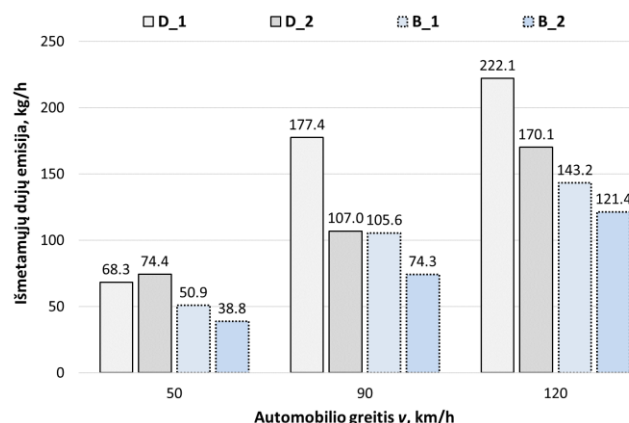
Šaltinis: sudaryta autorių

Variklio oro masės sąnaudas (kg/h) įtakoja daug veiksnių. Dyzeliniame variklyje oro sąnaudas daugiausia įtakoja variklio sūkliai ir turbokompresoriaus pripūtimo slėgis. Benzininiame variklyje lemiamą reikšmę oro sąnaudoms turi variklio sūkliai bei cilindrų pripildymas, kuris reguliuojamas priklausomai nuo galios poreikio. Turbokompresorius svarbią įtaką turi benzininiam varikliui veikiant padidinta galia. 1 bandymu nustatyta, kad dyzelinio variklio oro masės sąnaudos (kg/h) prie skirtingų greičių (50 km/h, 90 km/h ir 120 km/h) yra atitinkamai 38 %, 73 % ir 60 % didesnės, lyginant su benzininiu varikliu. 2 bandymo dyzelino variklio oro sąnaudos yra atitinkamai 97 %, 47 % ir 47 % didesnės už benzininio variklio oro sąnaudas (6 pav.). Tai reiškia, kad dyzelinis variklis veikia su dideliu oro pertekliumi degiajame mišinyje.

Dyzelinio variklio bendra išmetamųjų dujų (deginių) emisiją (kg/h) daugiausiai įtakoja įsiurbiamo oro masė bet įtakos turi ir įpurškiamų degalų masė. 1 bandymu nustatyta, kad dyzelinio variklio deginių emisijos (kg/h) prie skirtingų greičių (50 km/h, 90 km/h ir 120 km/h) yra atitinkamai 34 %, 68 % ir 55 % didesnės už benzininio variklio deginių emisijas. 2 bandymo dyzelinio variklio deginių emisijos yra atitinkamai 91 %, 44 % ir 50 % didesnės už benzininio variklio deginių emisijas (7 pav.). Esant vienodai, CO₂ koncentracijai (%) tačiau didesnei bendrai deginių emisijai (kg/h) šių dujų emisija (g/kWh) bus didesnė.

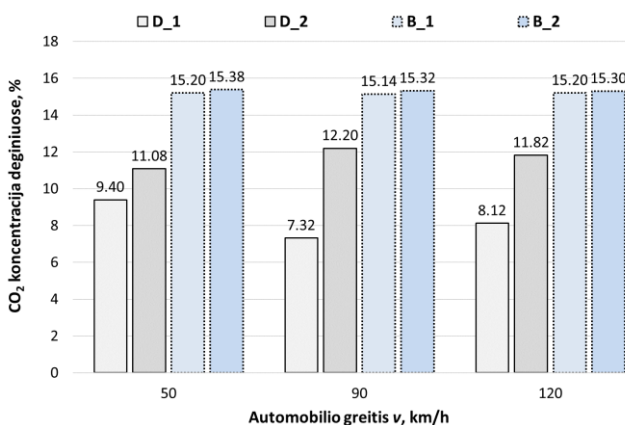


6 pav. Variklio oro sąnaudos (kg/h) kintant automobilio greičiui ir apkrovai
Šaltinis: sudaryta autorių

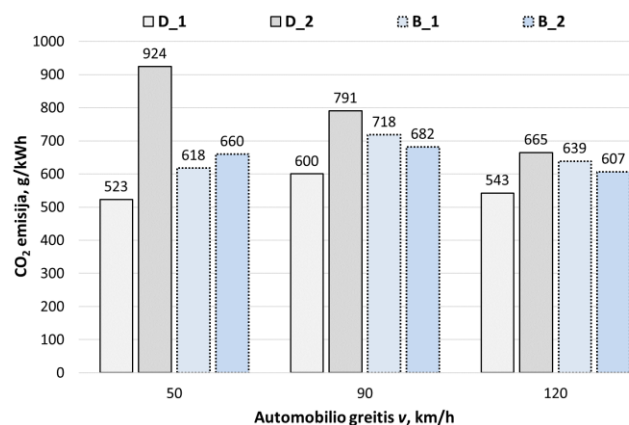


7 pav. Variklio išmetamųjų dujų emisija (kg/h) kintant automobilio greičiui ir apkrovai
Šaltinis: sudaryta autorių

1 bandymu nustatyta, kad CO₂ koncentracija (%) dyzelinio variklio deginiuose prie skirtingų greičių (50 km/h, 90 km/h ir 120 km/h) yra atitinkamai 38 %, 51 % ir 46 % mažesnės. 2 bandymo CO₂ koncentracija dyzelinio variklio deginiuose yra atitinkamai 27 %, 20% ir 22% mažesnė palyginus su benzininiu varikliu (8 pav.). Perėjus iš 1 bandymo režimo į 2 bandymo režimą CO₂ koncentracija benzininio variklio deginiuose mažai pakito (sumažėjo bendra deginių emisija (7 pav.)), o dyzelinio variklio deginiuose CO₂ koncentracija išaugo ~43 %. Toks CO₂ koncentracijos prieaugis dyzelinio variklio deginiuose paaiškinamas KD filtro regeneracija, kurios metu išdegunami filtre susikaupę suodžiai.



8 pav. CO₂ koncentracija (%) deginiuose kintant automobilio greičiui ir apkrovai
Šaltinis: sudaryta autorių



9 pav. CO₂ emisija (g/kWh) kintant automobilio greičiui ir apkrovai
Šaltinis: sudaryta autorių

Įvertinus apskaičiuotus bendrus deginių srautus ir CO₂ koncentraciją deginiuose apskaičiuota, kad 1 bandymo metu dyzelinio variklio CO₂ emisija (g/kWh) prie skirtingų greičių (50 km/h, 90 km/h ir 120 km/h) yra atitinkamai 15 %, 16 % ir 15 % mažesnė. 2 bandymo metu nustatyta kad dyzelinio variklio CO₂ emisija atitinkamai 40 %, 16 % ir 10 % didesnė palyginus su benzininiu varikliu (14 pav.). Toks ženklus CO₂ emisijos (g/kWh) prieaugis dyzelinio variklio deginiuose 2 bandymo metu paaiškinamas KD filtro regeneracija, kurios metu išdegunami (oksiduojami iki CO₂) filtre susikaupę suodžiai ir tam papildomai naudojami degalai.

Išvados

Atlikus dyzelinių ir benzininių automobilių degalų sąnaudų ir išmetamųjų dujų emisijų lyginamuosius tyrimus, automobiliams traukos stende važiuojant įvairiais greičiais ir apkrovomis ir pateikiame šiuos apibendrintus rezultatus:

- 1 bandymo metu dyzelinis ir benzininis varikliai apkrauti 3,0; 2,1; ir 1,8 karto didesne apkrova palyginus su apkrova automobiliui tolygiai važiuojant lygiu asfaltu 50 km/h; 90 km/h ir 120 km/h per valandą greičiais. Priverstinai buvo įjungiamos žemesnės pavaros ir variklio sūkliai buvo padidinti. 2 bandymo metu dyzelinis ir benzininis varikliai apkrauti 2,2; 1,6; ir 1,6 karto didesne apkrova. Pavarų dėžės valdymo algoritmo automatiškai įjungė aukštesnes pavaras ir variklio sūkliai buvo sumažinti. Šio bandymo metu pradėjo veikti kietųjų dalelių (KD) filtro regeneracija.

- 1 bandymo metu nustatyta, kad dyzelinio variklio vidutinės degalų sąnaudos (l/100 km) yra ~26 % mažesnės palyginus su benzininiu. 2 bandymo metu dyzelinio variklio degalų sąnaudos ~17 % mažesnės nei benzininio. Degalų sąnaudų skirtumas sumažėjo, nes dyzelinis automobilis papildomai naudojo degalus KD filtro regeneracijai.

- Apskaičiuota, kad dyzelinio variklio vidutinė CO₂ emisija (g/kWh ir g/km) 1 bandymo metu buvo ~16 % mažesnė palyginus su benzininiu. Tačiau atliekant 2 bandymą dyzelinio variklio CO₂ emisija ženkliai išaugo ir ~22 % viršijo benzininio emisiją. Dyzelinio automobilio CO₂ emisijos padidėjimo 2 bandymo metu priežastis – KD filtre susikaupusių suodžių (anglies junginių) oksidacija į CO₂ ir šiam procesui papildomai panaudoti degalai.

- Vertinant dyzelinio variklio KD filtro regeneracijos proceso įtaką variklio degalų sąnaudoms ir teršalų emisijoms galima teigti, kad regeneracijos proceso metu fiksuojamos padidėjusios degalų sąnaudos ir išaugusi CO₂ emisija. Tačiau KD filtro regeneracija vyksta sąlyginai trumpą laiką ir ridą palyginus su visa automobilio eksploatacija ir ženklesnės įtakos degalų sąnaudoms ir CO₂ emisijai neturi.

Literatūra

1. Acar, C., Dincer, I. (2019). Review and evaluation of hydrogen production options for better environment. *Journal of Cleaner Production* 218, 835–849.
2. Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., Mohammadi, P., Pourvosoughi, N., Nikbakht, A.M., Goli, S.A.H. (2015). Improving exergetic and sustainability parameters of a DI diesel engine using polymer waste dissolved in biodiesel as a novel diesel additive. *Energy Convers. Manag.* 105, 328–337.
3. Bae, C., Kim, J. (2017). Alternative fuels for internal combustion engines. *Proc. Combust. Inst.* 36, 3389–3413.
4. Battista, D., Bartolomeo, M., Cipollone, R. Flow and thermal management of engine intake air for fuel and emissions saving. *Energy Conversion and Management*, 173. 2018. P. 46–55.
5. Bereczky, A. (2017). The Past, Present and Future of the Training of Internal Combustion Engines at the Department of Energy Engineering of BME, in: Jarmai, K and Bollo, B (Ed.), *VEHICLE AND AUTOMOTIVE ENGINEERING, Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 225–234.
6. Bogacki, M., Bzdziuch, P. (2019). Urban bus emission trends in the Krakow metropolitan area (Poland) from 2010 to 2015. *Transp. Res. Part Transp. Environ.* 67, 33–50.
7. Burr, M., Gregory, C. (2011). Vehicular Exhausts, in: *Encyclopedia of Environmental Health*. Elsevier, 645–653.
8. Cleophas, C., Cottrill, C., Ehmke, J.F., Tierney, K. (2019). Collaborative urban transportation: Recent advances in theory and practice. *Eur. J. Oper. Res.* 273, 801–816.
9. Europos Audito Rūmai. ES išmetamas šiltnamio efektą sukiančių dujų kiekis. 2019, <https://op.europa.eu/lt/publication-detail/-/publication/e9e5a8cd-367f-11ea-ba6e-01aa75ed71a1/language-it>
8. Galindo, N., Yubero, E., Clemente, Á., Nicolás, J.F., Varea, M., Crespo, J. (2020). PM events and changes in the chemical composition of urban aerosols: A case study in the western Mediterranean. *Chemosphere* 244, 125520.
9. Heseding, M. and Daskalopoulos, P. (2006). *Exhaust Emission Legislation-Diesel- and Gas Engines*, VDMA, Frankfurt am Main.
10. Yamada, H., Misawa, K., Suzuki, D., Tanaka, Koichi, Matsumoto, J., Fujii, M., Tanaka, Kotaro. (2011). Detailed analysis of diesel vehicle exhaust emissions: Nitrogen oxides, hydrocarbons and particulate size distributions. *Proc. Combust. Inst.* 33, 2895–2902.
11. Jakubauskas, G. (2011). *Transporto politikos 2011 m. Baltoji knyga*, 23.
12. Kinney, P.L. (2018). Interactions of Climate Change, Air Pollution, and Human Health. *Curr. Environ. Health Rep.* 5, 179–186.
13. Kniūkšta, B. (2017). Biodegalų gamybos ir vartojimo modeliai Baltijos šalyse. *Manag. Theory Stud. Rural Bus. Infrastruct. Dev.* 39, 25.
10. Kumar, M., Muqem, M. Design of an intercooler of a turbocharger unit to enhance the volumetric efficiency of diesel engine. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, Vol. 4, Issue 3. 2013. P. 01-10.
11. Lajqi, N., Doc, I I., Lajqi, Sh. Modelling and Simulation of the Turbocharged Diesel Engine with Intercooler. *IFAC-PapersOnLine* 49-29, 2016. P. 237–242.

12. Lietuvos Respublikos Vyriausybės įsakymas Nr. 591/640 Dėl aplinkos oro užterštumo normų nustatymo. Vilnius: Valstybės žinios, 2001, http://www3.lrs.lt/pls/inter2/dokpaieska.showdoc_l?p_id=156726
14. Mock, P. (2014). European Vehicle Market Statistics: Pocketbook 2014, 121.
13. Muqem, M. Turbocharging With Air Conditioner Assisted Intercooler. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, Volume 2, Issue 3. 2012., P. 38-44.
15. Pechout, M., Kotek, M., Jindra, P., Macoun, D., Hart, J., Vojtisek-Lom, M. (2019). Comparison of hydrogenated vegetable oil and biodiesel effects on combustion, unregulated and regulated gaseous pollutants and DPF regeneration procedure in a Euro6 car. Sci. Total Environ. 696, 133748.
16. Solaimuthu, C., Ganesan, V., Senthilkumar, D., Ramasamy, K.K. (2015). Emission reductions studies of a biodiesel engine using EGR and SCR for agriculture operations in developing countries. Appl. Energy 138, 91–98.
17. Turkensteen, M. (2017). The accuracy of carbon emission and fuel consumption computations in green vehicle routing. Eur. J. Oper. Res, 647–659.
18. Valstybės įmonė REGITRA (2020). URL <https://www.regitra.lt/lt/duomenu-teikimo-paslaugos/duomenu-teikimo-paslaugos-1> (žiūrėta 2020.11.18).
19. World Energy Investment 2017 EXECUTIVE SUMMARY. Available at: <https://www.iea.org/Textbase/npsum/WEI2017SUM.pdf>. (žiūrėta: 2020-11-29).

COMPARATIVE STUDY OF FUEL CONSUMPTION AND CO₂ EMISSIONS OF DIESEL AND PETROL CARS

Summary

The article presents a study of the performance of diesel and gasoline cars with similar technical characteristics. The study was performed using a car load stand, which is used to simulate the car's travel at 50 km/h; at 90 km/h and 120 km/h at a pressure of heavier and lighter driving conditions. Under lighter driving conditions, the regeneration of the diesel particulate filter took place. During the experimental study, the fuel consumption of diesel and gasoline cars was determined, and their difference was evaluated. Comparative carbon dioxide (CO₂) emissions were calculated by estimating engine emissions and (CO₂) concentrations. An analysis of the change in carbon dioxide emission indicators of diesel and petrol cars was performed.

Key words: Fuel consumption, diesel, petrol, carbon dioxide.

AUTORIŲ LYDRAŠTIS

Autoriaus vardas, pavardė: Alfredas Rimkus.

Mokslo laipsnis ir vardas: daktaras, docentas.

Darbo vieta ir pozicija: VšĮ Vilniaus technologijų ir dizaino kolegijos, Automobilių transporto inžinerijos katedros docentas. VšĮ Vilniaus Gedimino technikos universiteto, Automobilių inžinerijos katedros docentas.

Autoriaus mokslinių interesų sritys: Transporto priemonės, vidaus degimo varikliai, transporto ekologija, alternatyvioji energetika.

Telefonas ir el. pašto adresas: +370 61571161, a.rimkus@vtdko.lt, alfredas.rimkus@vgtu.lt

A COVER LETTER OF AUTHORS

Author name, surname: Alfredas Rimkus.

Science degree and name: associated professor.

Workplace and position: Vilnius Technology and Design College, Automobile Transport Engineering department associated professor. Vilnius Gediminas Technical University, Automobile Engineering department associated professor.

Author's research interests: Vehicles, internal combustion engines, transport ecology, alternative energy.

Telephone and e-mail address: +370 61571161, a.rimkus@vtdko.lt, alfredas.rimkus@vgtu.lt

VARIKLIO ALYVOS KOKYBĖS POKYČIŲ TYRIMAS

Dalius Kalisinskas

Kauno technikos kolegija

Anotacija

Straipsnyje nagrinėjama, dyzelinio variklio, alyvos savybės. Atidirbtos alyvos savybės lyginamos su naujos alyvos savybėmis. Tai yra svarbu, nustatant motorinių transporto priemonių patikimumą, numatomą remontą ir priežiūrą. Dėl eksploatavimo proceso variklinės alyvos yra veikiamos fizinių ir cheminių pokyčių. Alyvos savybės gali pablogėti, dėl aukšto slėgio, temperatūros, taršos, oksidacijos alyvoje. Todėl reikia laikytis gamintojo rekomendacijų ir alyvą keisti reguliariai. Tačiau šios rekomendacijos gali būti nepakankamos realiam automobilio eksploatavimui. Optimalaus laiko nustatymas yra svarbus, nes sumažėja eksploatacinės išlaidos. Šiuo tikslu buvo matuojama alyvos klampa nuo temperatūros ir eksploatavimo laiko. Naujos ir panaudotos alyvos tepimo rezultatai buvo įvertinti tepimo savybių pokyčiais.

REIKŠMINIAI ŽODŽIAI: alyva, klampa, vidaus degimo variklis, suodžiai

Įvadas

Transporto priemonių variklių konstrukcinių sprendimų evoliucija yra susijusi su poreikiu nuolat gerinti alyvų parametrus. Tai yra svarbu nustatant motorinių transporto priemonių patikimumą, numatomą remontą ir priežiūrą. Dėl eksploatavimo proceso variklio alyvoje vyksta fizikiniai ir cheminiai pokyčiai. Darbo metu alyvą veikia aukštas slėgis, temperatūra, suodžiai, oksidacijos alyvoje (Zwierzycki, 1996). Suodžiai yra pagrindiniai dyzelinių variklių teršalai. Didelis suodžių kiekis blogina alyvų savybes. Šiuolaikiniams dyzeliniams varikliams yra keliami dideli reikalavimai tepimui, todėl gaminant alyvas yra pilama priedų. Gaminant alyvas, pagrindinė alyvų sudedamoji dalis yra bazinė alyva, kuri sudaro mažiausiai 70% viso alyvos kiekio, kitus 30% sudaro alyvų priedai. Priedai gali būti įvairūs: mažinantys dilimą, reguliuojantys alyvos klampą skirtingose temperatūrose, mažinantys alyvos oksidaciją, plaunamieji. Vienas iš priedų būtų dialkylditiofosfatas (ZDDP). Anti-dilimo priedai alyvoje sąveikauja su metaliniais paviršiais ir sudaro ribines tepimo plėveles, kurios yra jautrios abrazyviniam dilimui, kai yra anglies (Ryason et al., 1990). Vienas iš svarbiausių alyvos kokybės rodiklių yra alyvos klampa. Klamos padidėjimas arba sumažėjimas neigiamai veikia variklio mazgus. Klamos didėjimo priežastimi dažniausiai tampa į alyvą patekusios įvairios nepageidaujamos priemaišos, tai gali būti suodžiai, dulkės, mazgų dilimo dalelės.

Degimo metu susidariusią sieros rūgštį absorbuoja angliniai degimo produktai ir nuneša prie cilindro sienelių, to pasėkoje pradeda dilti cilindras ir žiedai. Dėl dilimo susidaro abrazyvinės dalelės, kurios dar labiau padidina dilimą (Wei et al., 2018). Alyvų oksidacija yra rimta problema, dėl kurios susidaro esdinančios rūgštys, polimeriniai junginiai, bei dervos. Dėl šių priežasčių prastėja alyvos tepimo savybės (Farshid et al., 2004).

Dažnai pasitaiko kai alyva yra užteršiama vandeniu. Vanduo alyvoje kondensuojasi, kai variklis dirba šaltas. Alyva susimaišiusi su vandeniu tampa emulsija, kuri gali užkimšti alyvos filtrus ir pakenkti varikliui (Lansdown 1996).

Šiomis dienomis alyvos keitimo intervalo vidurkis siekia apie 30 tūkstančių kilometrų, o neretai ir 50 tūkstančių ar daugiau. Gamintojai projektuodami variklį, jo konstrukciją, atlieka tyrimus, kurių eigoje nustato, kokio tipo ir kokių savybių alyva labiausiai tinka būtent tam varikliui. Todėl renkantis variklinę alyvą būtina įsitikinti, ar ji atitinka gamintojų nustatytus reikalavimus. Pasitaiko atveju, kad net ir laikantis nustatytų reikalavimų susiduriama su variklio gedimais. Kyla klausimas, ar tikrai nėra per didelis alyvos keitimo intervalas skirtas automobiliams? Galbūt atsižvelgiant į automobilio eksploatavimo sąlygas reikėtų vienais ar kitais atvejais mažinti kilometrų kiekį tarp alyvos keitimų, o galbūt imtis kitų priemonių.

Darbo tikslas:

Nustatyti, dyzelinio automobilio, variklinės alyvos kokybės pokyčius, eksploatacijos metu.

Uždaviniai:

1. Išanalizuoti variklinės alyvos kokybės rodiklius.
2. Ištirti variklinės alyvos kokybės pokyčius, automobiliui nuvažiavus tam tikrą kilometrų kiekį.

Variklinių alyvų savybės

Variklinės alyvos paskirtis yra tepti variklio vidaus detales, pašalinti degimo produktus, sumažinti trintį variklio viduje, apsaugoti detales nuo korozijos, išlaikant kuo ilgesnį jų darbingumą. Variklio darbo resursą galima prailginti tinkamai jį prižiūrint, tai yra reguliariai keičiant alyvas bei jų filtrus. Alyvų veiklos procesai varikliuose yra labai sudėtingi, jie priklauso nuo alkūninio veleno sukimosi dažnio, slėgio variklio mechanizmo dalims, variklio darbo temperatūros bei degalų degimo produktų. Viena pagrindinių variklinės

alyvos savybių yra klampa. Alyvos gebėjimas išlaikyti tinkamą tepimo plėvelę tarp metalinių besisukančių dalių, esant kintamoms temperatūroms bei slėgiams, lemia variklių darbo ilgaamžiškumą, trinties nuostolius, užvedimo lengvumą. Variklių sandara yra gana sudėtinga, turinti nemažai precizinių dalių ir mazgų, todėl netinkama jų priežiūra gali sudaryti nemažą dalį neplanuotų sąnaudų jų remontui.

Variklinės alyvos skvarba - tai alyvos klampumo charakteristika esant žemai temperatūrai ir mažam alyvos sluoksnių poslinkio greičiui. Tai labai svarbus variklinės alyvos rodiklis paleidžiant šaltą variklį. Būtent šiuo momentu iš variklio karterio pradedamas atšaldytos alyvos paėmimas į alyvos siurbį, kuris toliau tiekia alyvą į alyvos filtrą, o paskui per alyvos kanalus besitrinančioms detalėms tepti. Todėl gera variklinės alyvos skvarba žiemą yra labai svarbi normaliam ir ilgalaikiam variklio veikimui. Variklinės alyvos skvarbos temperatūros reikšmė visuomet 10 °C žemesnė nei alkūninio veleno prasukimo temperatūra ir 5 °C aukštesnė nei alyvos sustingimo temperatūra.

Bendras šarminis skaičius - tai variklinės alyvos apsauginė savybė rūgščių ir oksidų, atsirandančių eksploatacijos metu, neutralizacijai. Siekiant apskaičiuoti, kokį bendrą šarminį skaičių privalo turėti variklinė alyva konkrečiai kuro rūšiai, reikia sieros procentinį kiekį kuro sudėtyje padauginti iš 20. Variklinėse alyvose bendras šarminis skaičius sutrumpintai žymimas - TBN.

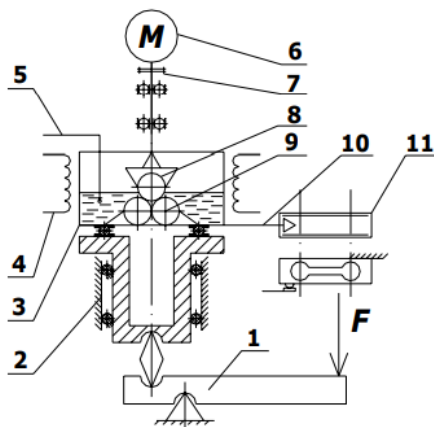
Alyvos priedai yra skirti pagerinti alyvos kokybę ir jai suteikti tam tikras savybes. Alyvos priedų gali būti įvairių, kurie padidina vienokias ar kitokias alyvos savybes, kurios suteikia tiek alyvai, tiek automobilio varikliui ilgaamžiškumo. Pagrindiniai alyvų priedai yra šie: (Tribologija)

- klampumo priedai;
- dilimą mažinantys priedai;
- antikoroziniai priedai;
- antioksidaciniai priedai;
- plovimo priedai;
- specialūs priedai.

Alyvos pagrindą, mažiausiai 70 %, sudaro bazinė alyva, likusius 30 % – priedai. Variklyje alyvą veikia skirtingos darbo sąlygos, dėl kurių keičiasi ir jos savybės. Norint užtikrinti, kad alyva neprarastų savo tepimo savybių įvairiomis darbo sąlygomis yra naudojami įvairūs priedai. Dėl aukštos temperatūros variklio darbo metu vyksta oksidacija, todėl yra naudojami antioksidantai, didelis temperatūrų pokytis veikia alyvos klampą, esant aukštai temperatūrai klampa mažėja, o esant žemai – didėja, taigi dėl šios priežasties naudojami klampos indekso modifikatoriai. Kadangi alyvai tenka atlaikyti dideles apkrovas, reikia užtikrinti tepimą ir tokiu metu. Norint tai užtikrinti naudojami priedai dilimo mažinimui. Kadangi alyvos funkcija ne tik tepti vidaus degimo variklio mazgus, bet ir plauti patekusius nešvarumus, nepageidautinas medžiagas ir daleles, susikaupusius suodžius ir t. t., siekiant pagerinti šią alyvos funkciją taip pat naudojami specialūs priedai (Baltėnas ir kt. 1998).

Alyvos kokybės tyrimas

Tyrimams atlikti pasirinktas automobilis Nissan Qashqai 1.5dci. Automobilio rida 82000 km. Tiriama alyva 5w30. Alyvos tyrimas atliktas kai alyva yra nauja, nuvažius 15000, 20000, 25000 ir 30000 km. Alyvai tirti buvo naudojamas keturių rutulių tribologinis bandymas ir klampai nustatyti naudotas rotorinis vizkozimetras.

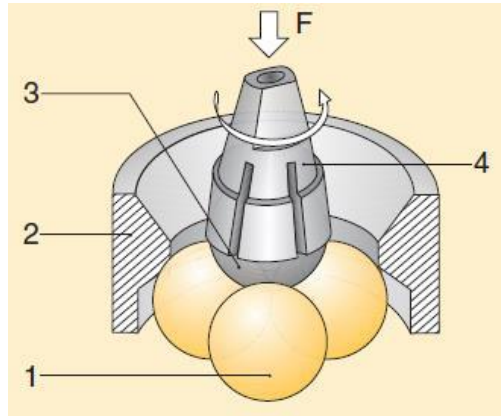


1 pav. Keturių rutulių tyrimo mašinos struktūrinė schema: 1 – apkrovos perkėlimo svirtis; 2 – vertikalus centrinis guolis; 3 – alyvos mėginio talpa; 4 – alyvos kaitinimo elementas; 5 – termopora; 6 – elektros variklis; 7 – sankaba; 8 – viršutinis sukamasis rutulys; 9 – įtvirtini, nejudantys rutuliai; 10 – sukimo momento perdavimo svirtis; 11 – jėgos daviklis

Šaltinis: TIANHUI, Ren; QUNJI, Xue; HANQING, Wang. A Study of S-(1H-benzotriazol-1-yl) methyl N, N-dialkyldithiocarbamates as Novel Multifunctional Oil Additives. Wear, 1994, 172.1: 59-64.

Tiriant alyvą keturių rutulių tribologiniu metodu imituojamos apkrovos, kurios tenka variklio mazgams. Bandymas atliekamas esant spaudimui, įvyksta trintis tarp paviršių, šis būdas nusako alyvos savybę mažinti trintį esant didelėm apkrovom. Keturių rutulių tyrimo mašinos schema pavaizduota 1 pav.

Bandymams atlikti naudojami standartiniai rutuliai, jie yra pagaminti iš AISI E52100 chromo lydinio plieno. Visų rutulių skersmuo yra 12,7 mm kietumas 64-66 HRC (Muraco et al., 2012). Atliekant bandymus, kiekvieną kartą imami nauji rutuliukai. Keturių rutulių trinties mazgas pateiktas 2 pav. Bandymo metu trys nejudami rutuliai yra priveržiami prie pagrindo, o ketvirtas yra įstatomas į specialų laikiklį, jam yra suteikiamas sukamasis judesys. Rutuliai yra panardinami į bandomos alyvos vonelę. Nustatoma jėga, rutulių paviršiai nudyla proporcingai. Alyva slopina rutulių dilimą. Svarbus rodiklis yra nudilimo pėdsako dydis. Jis parodo, kaip greitai dėvisi rutuliai esant pastoviai apkrovai.



2 pav. Keturių rutulių alyvos bandymo mašinos trinties mazgas: 1 – nejudantys, įtvirtinti rutuliai; 2 – alyvos vonelė su atraminis žiedu; 3 – sukamasis rutulys; 4 – laikiklis

Šaltinis: Lubricant testing. Prieiga per internetą: <www.klueber.co.kr/index/images/pdf/Lubricant-testing.pdf>

Kiekvienas bandymas buvo atliekamas vieną valandą. Bandymui pasibaigus optiniu mikroskopu išmatuojama nudilusio paviršiaus skersmuo. Bandymo rezultatai pateikti 1 lentelėje.

1 lentelė

Keturių rutulių tyrimo rezultatai

Bandoma alyva	Nauja	Nuvažiavus 20000 km	Nuvažiavus 25000 km	Nuvažiavus 30000 km
Bandinio nudilusio paviršiaus skersmuo, mm	0,389	0,451	0,784	0,923
Vidutinis trinties momentas bandymo metu, mNm	113	126	150	168
Alyvos temperatūra bandymo pradžioje, °C	18,8	21,4	21,2	22,1
Alyvos temperatūra bandymo pabaigoje, °C	93,1	94,2	94,5	96
Alyvos temperatūros pokytis, °C	74,6	72,8	73,3	73,9

Šaltinis: sudaryta autoriaus

Alyvos kokybę nusako fizikiniai-cheminiai rodikliai bei jos užterštumas įvairiomis priemaišomis. Didėjant alyvos užterštumui, dėl nepageidaujamų priemaišų, taip pat didėja ir alyvos klampa. Didelę įtaką variklio darbo resursams turi jo eksploatacinių sąlygų. Kai automobilis yra dažnai stabdomas po to vėl įsibėgėjamo variklio resursai mažėja greičiau, nei eksploatuojant nuolatiniu režimu. Tai pat turi įtakos alyvai ir važinėjant automobiliu trumpus atstumus. Kai variklis nėra išilęs iki darbinės temperatūros į alyvą patenka daugiau nešvarumų dėl riebesnio kuro mišinio. Prastėjant alyvos kokybei ir didėjant jos užterštumui, eksploatuojant variklį, atsiranda intensyvus dilimas, o padidėjus dilimui padidėja dilimo detalių, kurios taip pat teršia alyvą.

Iš gautų duomenų intensyvesnis dilimas pastebėtas kai variklinės alyvos eksploatacivimas viršija 25000 km. Iki 20000 km pravažiavus automobiliu alyvos tepamosios savybės labai nežymiai pakinta lyginant su

nauja alyva. Išanalizavus duomenis rekomenduotina alyva keisti ne kas 30000 km, kaip numato gamintojas, bet kas 25000 km.



3 pav. Rotorinis viskozimetras

Šaltinis: www.lt.gzyeto.com/lab-machine/ndj-laboratory-rotary-viscometer-testing.html

Alyvos klamos tyrimai atlikti prie 40°C, 80°C ir 100°C temperatūros. Klampa matuota naudojant rotorinį viskozimetą 3 pav. Į stiklinį indą yra įpilama tiriama alyva, įmerkiamas rotorius, pasirenkama norima temperatūra. Rotorius sukasi alyvoje nustatytu sukimosi dažniu, matuojamas sukimosi momentas. Remiantis alyvos sukeliamu pasipriešinimu gaunami rezultatai, nustatoma alyvos klampa. Alyvos klampa išreiškiama $mPa \cdot s$ SI vienetais. Gauti rezultatai surašyti į 2 lentelę.

2 lentelė

Alyvos klampa

Temperatūra °C	Klampa mPa·s			
	Nauja alyva	Nuvažiavus 20000km	Nuvažiavus 25000km	Nuvažiavus 30000km
40	50,72	57,67	63,17	73,01
80	20,40	21,37	19,37	18,95
100	14,24	13,85	13,93	13,68

Šaltinis: sudaryta autoriaus

Alyvos klampa nesuteikia visos informacijos apie variklinės alyvos pokyčius senėjimo procese. Galima pastebėti, naujos alyvos klampa esant darbinei variklio temperatūrai yra šiek tiek didesnė, nei panaudotos alyvos. Esant šaltam varikliui prie didesnio pravažiuotų kilometrų skaičiaus klampa didėja. Tam įtakos gali turėti priemaišos (teršalai) patekę į alyvą.

Išvados

1. Alyvos kokybė gerinama naudojant priedus. Priedų alyvoje naudojama iki 30%.
2. Atlikus keturių rutulių bandymą, rekomenduotina alyvą keisti kas 25000km, viršijus pastebėta intensyvesnis dilimas.
3. Alyvos klampa nesuteikia visos informacijos apie variklinės alyvos pokyčius senėjimo procese.

Literatūra

1. Baltėnas R. Sologubas L. Sologubas R. Automobilių degalai ir tepalai. Vilnius. 1998. 58-64p.
2. Farshid Owrang, Håkan Mattsson, Jim Olsson and Jörgen Pedersen, Thermochemica Acta 413 (2004) 241–24.
3. Lansdown A. R., Lubrication and Lubrication Selection, Mechanical Engineering Publications, UK, 1996.
4. Morris S., Wood R.J.K., Harvey T.J., Powrie H.E.G., ASME Journal of Tribology 124(2) (2002), 288-296.
5. Muraco, Marco Antonio, et al. The influence of contact stress distribution and specific film thickness on the wear of spur gears during pitting tests. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2012, 34.2: 135-144.
6. Ryason P. R., Chan I. Y. and Gilmore J. T., Polishing wear by soot, Wear, 137 (1990) 15-24.
7. Tribologija, paskaitų medžiaga, Doc. E.Juzėnas, Kauno Technologijos Universitetas.
8. Wei L, Duan H, Jin Y, Jia D, Chen S, Liu J and Li J 2018 *Oil change interval evaluation of civilian cars in urban traffic condition*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers.
9. Zwierzycki W 1996 *Oleje smarowe, Dobór i użytkowanie*, Rafineria Nafty Glimar, Gorlice
10. TIMKEN LOAD MACHINE (ASTM D 2782 Test Method) [žiūrėta 2020-04-29] Prieiga per internetą: <http://lupromaxmagnaimdonesia.blogspot.lt/2013/07/pengujian.html>.
11. Oil Viscosity - How It's Measured and Reported [žiūrėta 2020-09-28] Prieiga per internetą: <http://machinerylubrication.com/Read/4111/oil-viscosity>.

12. Used Lube Oil Analysis and Analytical Ferrography [žiūrėta 2020-09-25] Prieiga per internetą: <http://www.stlehouston.com/2HoustonSTLE/20132014/Program/Used20Lube%20Oil%20Analysis%20and%20Analytical%20Ferrography.pdf>.

INVESTIGATION OF CHANGES IN ENGINE OIL QUALITY

Summary

The article deals with diesel engine oil. The new oil is compared to the used oil. This is important in determining the reliability, expected repairs and maintenance of motor vehicles. Due to the operational process, engine oils are exposed to physical and chemical changes. The properties of the oil can deteriorate due to high pressure, temperature, pollution, oxidation in the oil. Therefore, the oil should be changed regularly as recommended by the manufacturer. However, these recommendations may not be sufficient for the actual operation of the vehicle. Determining the optimal time is important because it reduces operating costs. For this purpose, the viscosity of the oil from temperature and service life was measured. The lubrication results of the new and used oil were evaluated by changes in lubrication properties.

AUTORIŲ LYDRAŠTIS

Autoriaus vardas, pavardė: Dalius Kalisinskas

Mokslo laipsnis ir vardas: magistras.

Darbo vieta ir pozicija: VšĮ Kauno technikos kolegijos, Autotransporto elektronikos studijų programos lektorius.

Autoriaus mokslinių interesų sritys: transporto technologijos, inžinerinių tyrimų metodologija.

Telefonas ir el. pašto adresas: 8 681 77017, dalius.kalisinskas@edu.ktk.lt

KROVINIO PRIEKABOJE PADĖTIES ĮTAKOS SĄSTATO STABILUMUI TYRIMAS

Kastytis Laurinaitis, Tatjana Sokolova
Kauno technikos kolegija

Anotacija

Tinkamai pakrauta lengvojo automobilio priekaba lemia viso automobilio ir priekabos sąstato stabilumą. Netinkamas sprendimas yra talpinti krovinį tik priekabos priekyje arba tik gale. Priekaboje krovinio svoris turi būti išdalintas tolygiai ir apkrauti tik priekabos ašį. Automobilio ašių apkrovos turi nesikeisti. Netinkamai pakrauta priekaba važiuojant pradeda švytuoti į šonus, kelia pavojų kitiems eismo dalyviams ir gali sukelti avariją. Straipsnyje nagrinėjama krovinio padėties įtaka priekabos šoniniams švytavimams.

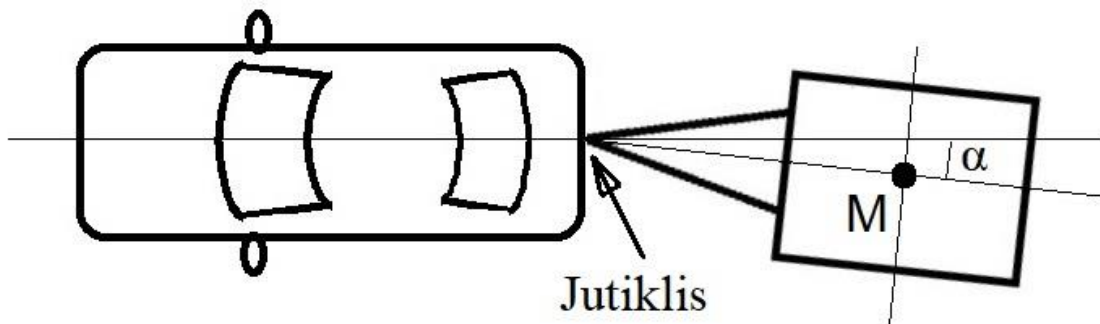
Raktiniai žodžiai: krovinys, automobilis, sąstatas, priekaba, stabilumas

Įvadas

Elektroninės saugos, pagalbinės sistemos išgali praktiškai visų segmentų automobiliuose (Darling, 2009: 471-484; Fischer, 2002: 7-10). Tiek lengvasis ir komercinis transportas, sunkvežimiai aprūpinti įvairiomis stabdžių antiblokavimo (ABS), traukos kontrolės ir stabilumo (ESP), saugos pagalvių (SRS), važiavimo linijos asistento, saugos kamerų ir įvairiomis kitomis mechaninėmis, sąstato stabilumą užtikrinančiomis sistemomis (Padidintos trinties, 2020). Visų sistemų pagrindinė funkcija, didinti eismo dalyvių saugumą, komfortą ir palengvinti pačių mašinų valdymą (Priekabos stabilumo, 2020). Sunkiajame transporte dirba savo srities specialistai – profesionalai. Dauguma jų žino, kaip tinkamai pakrauti transporto priemonės, kaip teisingai išskirstyti apkrovą vilkiko ir priekabos ašims, kokie reikalavimai yra krovinų tvirtinimui. Deja situacija tarp lengvųjų automobilių vairuotojų yra kiek blogesnė. Retas vairuotojas žino, kaip tinkamai pakrauti lengvojo automobilio priekabą, kaip tinkamai joje paskirstyti svorį, kaip krovinį tvirtinti. Krovinio pozicija priekaboje lemia sąstato valdomumo charakteristikas, eismo saugumą (Darling, 2009: 471-484). Kokių atsargumo priemonių reikia imtis vairuojant lengvojo automobilio ir priekabos sąstatą. Žinoma, čia taip pat gelbsti įvairios automobilio ir priekabos stabilumo programos, priekabos vairavimo atbulomis asistentas. Tačiau jei yra peržengtos statikos ir kinematikos ribos net ir pačios tobuliausios elektroninės sistemos pagelbėti nėra pajėgios. Anot Hübner ir Schnieder (Hübner, 2010: 44-51) priekabos švytavimai ir viso sąstato stabilumas stipriai priklauso nuo važiavimo greičio ir nuo to, ar yra automobilyje įjungta ESP stabilumo sistema ar ne.

Tyrimų metodika

Eksperimentiniams tyrimams naudotas M1 kategorijos lengvasis 1580 kg masės automobilis (Automobilio techniniai, 2020) ir O1 kategorijos, bendroji masė iki 750 kg, lengvojo automobilio priekaba (Valstybinės kelių, 2020). Ant sukabinimo įtaiso sumontuotas „Angle sensor 424A“ kampo padėties jutiklis, matuojantis automobilio išilginės ašies ir priekabos išilginės ašies pasisukimo kampus. Jutiklio kampo matavimo rezultatai fiksuojami skaitmeniniu oscilografu „PicoScope 4000“. Naudojantis Pico Scope programine įranga užrašomi įtampos matavimo rezultatai, kurie vėliau apdorojami. Pagal jutiklio įtampos pokytį įvertinamas kampo α tarp automobilio ir priekabos išilginių ašių dydis (1 pav.).



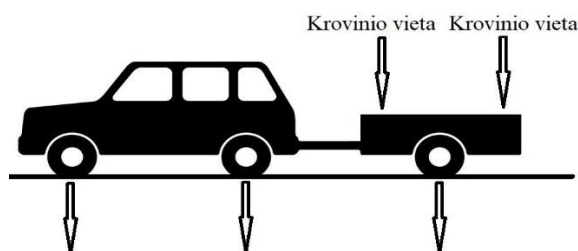
1 pav. Automobilio ir priekabos išilginių ašių pokrypio kampas ir taško M pozicija. Šaltinis: sudaryta autoriaus

Taškas M (1 pav.), kurio poslinkis buvo skaičiuojamas, tai priekabos išilginės simetrijos ašies ir priekabos ratų ašies teorinis susikirtimo taškas. Žinant taško M atstumą nuo sukabinimo spynos (1850 mm) ir ašies posūkio kampą α skaičiuojamas taško poslinkis skersine kryptimi priekabos atžvilgiu.

Automobilio ir priekabos ašių apkrovos įvertintos naudojantis automobilinėmis vienos ašies svarstyklėmis WPD-2 (± 2 kg). Bandymų metu priekabos padangų slėgis buvo 0,2 MPa, o automobilio padangose 0,23 MPa.

Bandymams buvo pasirinkta 2 km ilgio kelio atkarpa uždaroje teritorijoje. Dalis šio kelio atkarpos buvo naudojama išibėgėjimui iki 80 km/h greičio. Tuomet atliekami matavimai nustatytoje 1 km ilgio kelio atkarpoje. Paskutinė kelio atkarpos dalis buvo naudojama važiavimo greičiui po bandymo sumažinimui.

Priekabos pakrovimui buvo naudojami betoniniai blokeliai. Atlikti bandymai su 200 ir 400 kg svoriu. Svorio paskirstymas priekaboje buvo numatyta tokiomis proporcijomis: 200/0, 150/50, 100/100, 50/150, 0/200. Tai reiškia, kad pirmuoju bandymu priekabos priekinėje dalyje buvo 200 kg svorio, o priekabos galinėje dalyje 0 kg. Toliau blokeliai dalimis perkeliama į galinę priekabos dalį: 150 kg priekyje, ir 50 kg gale, 100 kg priekyje ir 100 kg gale, 50 kg priekyje ir 150 kg gale, bei 0 kg priekyje ir 200 kg gale.

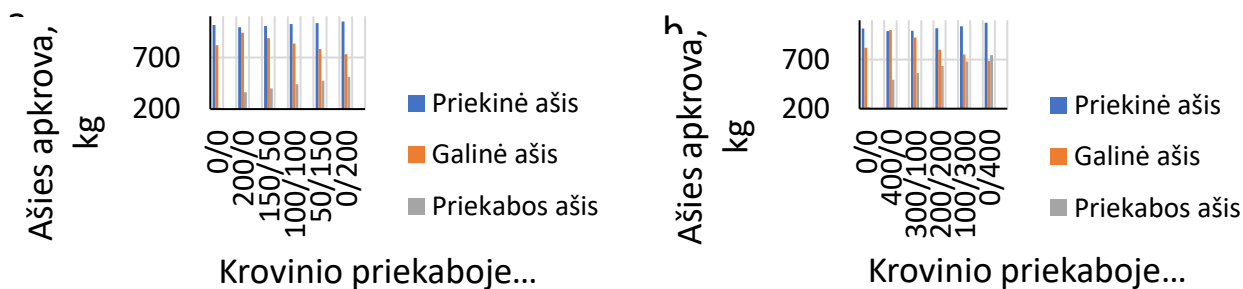


2 pav. Sąstato ašių apkrovos ir galima krovinio padėtis priekaboje
Šaltinis: sudaryta autoriaus

Tokiu pačiu dėsningumu buvo atlikti matavimai ir su 400 kg svoriu. 400/0 – 400 kg priekyje, ir 0 kg gale, 300/100 – 300 kg priekyje ir 100 kg gale, 200/200 svoris padalintas po lygiai, 100/300 – 100 kg priekyje ir 300 kg gale, bei 0/400 – 0 kg priekabos priekyje ir 400 kg priekabos gale (2 pav.).

Tyrimų rezultatai

Tyrimuose naudotas automobilis su įranga ir dviem ekipažo nariais svėrė 1836 kg. Tuščia priekaba svėrė 216 kg. Visa sąstato masė buvo 2052 kg. Keičiant priekaboje esančio krovinio padėtį, gauti ašių apkrovos rezultatai pateikti 3 paveiksle.



3 pav. Krovinio priekaboje padėties įtaka automobilio ir priekabos ašių apkrovoms
a) – 200 kg krovinyje, b) – 400 kg krovinyje. Šaltinis: sudaryta autoriaus

Kai priekaba tuščia, ašių apkrovos pasiskirstę taip: priekinės automobilio ašies apkrova yra 1016 kg, galinės automobilio ašies – 820 kg, ir priekabos – 216 kg. Į priekabą sukrovus 200 kg krovinį, priekinės automobilio ašies apkrova sumažėja 22 kg. Galinės ašies apkrova padidėja 122 kg, o priekabos ašies apkrova padidėja 146 kg. Kraunant visą krovinį į priekabos priekinę dalį, krovinio svorio dalis tenka priekabos ašiai ir taip pat galinei automobilio ašiai. Šiuo atveju labai stipriai nusizengiama kelių eismo taisyklių ir priekabos saugios eksploatacijos nuostatų reikalavimas, kuriuose nurodoma, kad priekabos sukabinimo įtaiso (spynos) ir automobilio kablės vertikali apkrova neturi viršyti 100 kg. Priekinės automobilio ašies apkrovos sumažėjimas paaiškinamas ir pagrindžiamas svėro principo dėsningumu. Kraunant visą krovinį į priekinę priekabos dalį, didelė svorio dalis tenka sukabinimo įtaisui. Čia veikianti sunkio jėga per galinę automobilio

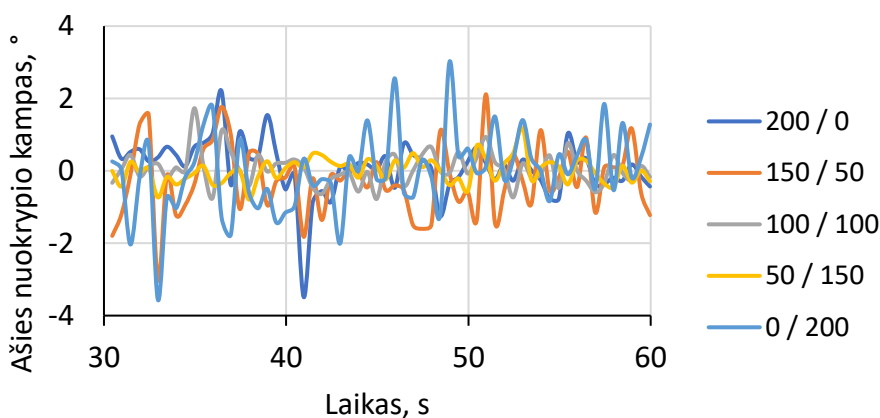
ašį sudaro svertą ir stengiasi pakelti priekinę automobilio dalį. Žinoma, kad priekinės ašies apkrovos sumažėjimas 22 kg neturi labai didelės įtakos važiavimui, tačiau tikėtina, kad turės įtakos automobilio stabdymo dinamikai (tokie bandymai nebuvo atlikti). Čia reikia įvertinti net tik priekinės ašies apkrovos sumažėjimą, bet ir tai, kad viso sąstato masė padidėjo 416 kg (216 kg. priekabos masė ir 200 kg krovinio masė).

Krovinį priekaboje išdėliojant kitomis proporcijomis, keičiasi ir ašių apkrovos. Priekaboje dalį krovinio talpinant galinėje jos dalyje, mažėja automobilio galinės ašies apkrova, didėja priekinės ašies apkrova, didėja pačios priekabos ašies apkrova. Krovinį priekaboje paskirsčius tolygiai 50 / 50 %, automobilio tiek priekinės tiek ir galinės ašių apkrovos pasidaro lygios apkrovoms, kai priekaba yra tuščia. Visą krovinio masę tuo metu veža tik priekabos važiuoklė. Sukabinimo spynos ir automobilio kablo apkrova atitinka keliamus saugumo reikalavimus ir neviršija 100 kg vertikalios apkrovos.

Krovinį kraunant labiau į priekabos galą, stipriai apkraunama priekabos ašis. Galinės automobilio ašies apkrova palaipsniui mažėja, o priekinės automobilio ašies didėja. Jei visas krovinys sukongcentruotas priekabos gale, tai priekabos ašies apkrova pasiekia 512 kg. Galinės automobilio ašies apkrova sumažėja 88 kg, o priekinės ašies apkrova padidėja 32 kg. Kadangi stabdymo metu priekinė ašis atlieka pagrindinį darbą, tai šios ašies apkrovos padidėjimas turės teigiamos įtakos. Tačiau sumažėjęs automobilio galinės ašies apkrovimas sumažina viso sąstato stabilumą. Pasiekus tam tikrą važiavimo greitį (apie 60 – 70 km/h) ne retai susidaro situacija, kai sąstatas ima suptis. Prasideda priekabos švytavimas į šonus, kuris nemažinant važiavimo greičio toliau progresuoja. Švytuojant priekabai į šonus, yra tampomas ir automobilis, vairuoti darosi sudėtinga ir pavojinga. Toks priekabos švytavimas tampa ir avarių priežastimi.

Kraunant į priekabą 400 kg krovinį, ašių apkrovos dėsniumai išlieka tokie patys, kaip ir su 200 kg. Jei krovinys priekabos priekyje, priekinės automobilio ašies apkrova mažėja, galinės didėja, priekabos ašies apkrova lieka mažiausia. Tačiau sukrovus visą krovinį priekabos priekyje, automobilio galinės ašies apkrova pasidaro didesnė už priekinės automobilio ašies apkrovą. O sukrovus visą krovinį priekabos gale, priekabos ašies apkrova pasidaro didesnė už automobilio galinės ašies apkrovą. Tai jau pavojingas reiškinys. Juk sąstato posūkio metu ar stabdant, priekaba judėdama iš inercijos gali tiesiog nustumti automobilio galinę ašį. Taip pat, reikia pastebėti, kad nors į priekabą pakrauta 400 kg (leidžiama pakrauti 534 kg = 750 kg (O1 kategorija) – 216 kg (tuščios priekabos masė)), priekabos ašies apkrova 746 kg priartėjo prie leistinos 750 kg ribos. Pakrovus į priekabą likusius galimus 134 kg. ašies apkrova viršytų leidžiamas normas pagal kelių eismo taisykles O1 kategorijos priekaboms.

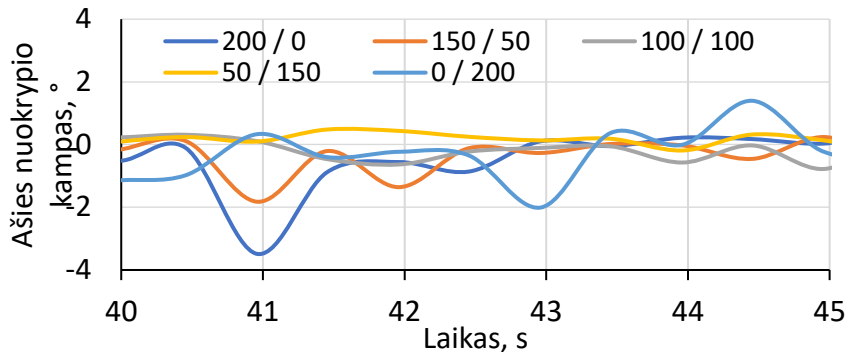
Priekabos išilginės ašies pagal važiavimo kryptį ir automobilio išilginės ašies pozicijos viena kitos atžvilgiu nekinta tik sąstatui stovint. Važiuojant šioms transporto priemonėms junginyje, nuolatos vyksta dinaminis kitimas. Tiek automobilio, tiek ir priekabos pozicijos važiuojant keičiasi visose trijose erdvės ašyse. Bandymų metu buvo nagrinėjama tik vienos išilginės ašies kitimo dėsniumai. Priimama sąlyga, kad automobiliui važiuojant jo išilginė ašis lieka stabili, jokie veiksmai vairu bandymų metu neatliekami ir automobilis važiuoja visuomet tik tiesiai. Iš paskos sekanti priekaba turėtų visiškai atkartoti važiavimo trajektoriją jei neatliekami posūkio manevrai. Tačiau taip yra tik teorijoje. O praktikoje automobilio išilginė simetrijos ašis bei priekabos simetrijos ašis viena kitos atžvilgiu nuolatos kinta (4 pav.).



4 pav. Krovinio padėties įtaka priekabos simetrijos ašies nuokrypio kampui. Šaltinis: sudaryta autoriaus

Ši ašių pasisukimą viena kitos atžvilgiu lemia daug veiksnių: važiavimo greitis, kelio nelygumai, padangų slėgis, krovinio padėtis priekaboje, meteorologinės sąlygos ir kita. Tyrimų metu buvo nagrinėjama tik krovinio padėtis priekaboje įtaka.

Bandymų duomenys analizuojami skaidant visą matavimą į kelių sekundžių intervalus. Taip galima detaliau matyti vykstančius pokyčius (5 pav.).



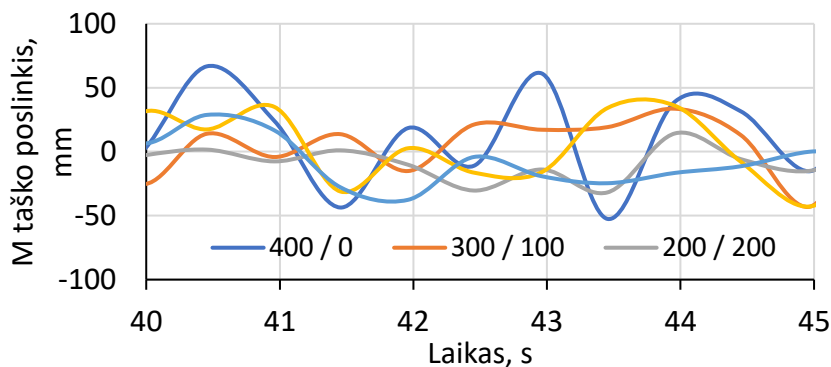
5 pav. Krovinio padėties įtaka priekabos simetrijos ašies nuokrypio kampui. Šaltinis: sudaryta autoriaus

Kai automobilis su priekaba važiuoja 80 km/h greičiu, o 200 kg krovinyš visas sukrautas priekabos priekinėje dalyje, automobilio ir priekabos išilginės ašys viena nuo kitos nukrypsta iki 3,5 laipsnių kampui. Kai atstumas nuo sukabinimo spynos posūkio centro iki taško M yra 1850 mm, tai vieno laipsnio nukrypimas atitinka 33 mm poslinkį. Tad kai kampas siekia 3,5 laipsnio, taškas M pasislenka 115 mm į vieną pusę.

Analizuojant krovinio padėties įtaką, galima išvelgti tokius dėsningumus. Kai visas krovinyš patalpintas priekabos priekyje (200/0) arba gale (0/200), priekabos ašies nukrypimai būna didesni, amplitudė kinta nuo minus 3,5 iki 3 laipsnių (4 pav.). Nukrypimas nuo centrinės padėties ir grįžimas atgal iki jos užtrunka apie 1 sekundę. Bandymų metu, nepriklausomai kurioje priekabos vietoje patalpintas krovinyš, nebuvo susidariusi situacija, kad priekaba pradėtų blaškytis į šonus vis didėjančia amplitudė. Tokios situacijos buvo stengiamasi išvengti. Priekabos ir automobilio sąstato stabilumą padėjo užtikrinti techniškai tvarkingos transporto priemonės bei pakankamai lygi kelio danga.

Krovinių padalinius kitomis proporcijomis, 150 kg priekabos priekyje ir 50 kg gale, maksimalus priekabos išilginės ašies pasisukimo kampas sumažėja. Taip paskirsčius krovinių, maksimali svyravimų amplitudė kinta nuo minus 2 iki 2 laipsnių. Bendroji svyravimų amplitudė sumažėja 2,5 laipsnio.

Kuomet krovinyš yra paskirstytas priekaboje 100/100 ir 50/150 kg proporcijomis, priekabos ašies kampo pokytis buvo mažiausias. Į viena ir į kitą puses priekaba nukrypavo ne daugiau nei vienas laipsnis.



6 pav. Krovinio padėties įtaka priekabos taško M poslinkiui. Šaltinis: sudaryta autoriaus

Pakrovus priekabą 400 kg svoriu, kai visas krovinyš priekabos priekyje, priekabos judėjimo dėsningumas išlieka. Priekabos ašies kampas buvo didžiausias. Priekabos taškas M nuo vienos kraštinės padėties iki kitos kraštinės padėties judėjo 118 mm amplitudė (6 pav.). Perskirstant krovinių priekaboje 300/100, 100/300, 0/400 kg proporcijomis, taško M judėjimo trajektorija mažėjo ir sudarė ~ 70 mm. Kai krovinyš priekaboje buvo paskirstytas 200/200 kg proporcija, taško M judėjimo amplitudė sumažėjo iki 45 mm amplitudės. Priešingai nei bandymuose su 200 kg kroviniu, pakrovus 400 kg svorį į priekabos galą, judėjimo į šonus amplitudė, bandymų metu, nedidėjo. Tai būtų galima paaiškinti tuo, kad sukrovus 400 kg svorį priekabos gale, priekabos lingės išsitiesė ir ašis atsirėmė į eigos ribotuvus. Šie guminiai ribotuvai susiplojo ir pakeitė priekabos amortizacijos charakteristikas.

Išvados

1. O1 kategorijos lengvojo automobilio priekaba išlieka stabiliausia, kai krovinys priekaboje paskirstomas tolygiai priekinei ir galinei daliai.

2. Didžiausi priekabos simetrijos ašies pasisukimo kampai nuo minus 3,5 iki 3 laipsnių gauti kai 200 kg svorio krovinys buvo talpinamas priekabos priekinėje dalyje.

3. 400 kg svorio krovinį sukrovus priekabos gale, priekabos ašies apkrova pasidarė 58 kg didesnė nei automobilio galinės ašies apkrova.

Literatūra

1. Automobilio techniniai parametrai. Prieiga per internetą: <https://www.auto-data.net/en/volkswagen-touran-i-1.9-tdi-100hp-8541>. Žiūrėta 2020 03 25
2. Darling, J., Tilley, D., Gao, B. 2009. An experimental investigation of car—trailer high-speed stability. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 223.4: 471-484.
3. Fischer, G., Heyken, R., & Trächtler, A., 2002. Active stabilization of the car/trailer combination for the BMW X5. ATZ worldwide, 104(4), 7-10.
4. Hübner, M., Schnieder, E., 2010 Lateral stabilization of vehicle trailer combinations by means of sliding mode control. ATZ worldwide, 112.2: 44-51.
5. Padidintos trinties sukabinimo spynos. Prieiga per internetą: <https://www.alko-tech.com/de/anti-schlingerkupplung-akstm-3004>. Žiūrėta 2020 04 04.
6. Priekabos stabilumo didinimo įrenginys. Prieiga per internetą: <https://www.alko-tech.com/uk/al-ko-trailer-control-atc>. Žiūrėta 2020 04 05.
7. Valstybinės kelių transporto inspekcijos prie susisiekimo ministerijos viršininko įsakymas „Dėl motorinių transporto priemonių ir jų priekabų kategorijų ir klasių pagal konstrukciją reikalavimų patvirtinimo“. Prieiga per internetą: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/documentSearch/lt>. Žiūrėta 2020 02 10.

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF A FREIGHT POSITION ON TRAILER ON TRAIN STABILITY

Summary

A properly loaded passenger car trailer determines the stability of the entire car and trailer combination. The wrong solution is to place the load only at the front of the trailer, or only at the rear. In a trailer, the weight of the load must be evenly distributed and only load the axle of the trailer. The axle loads of the vehicle must not change. An improperly loaded trailer starts to sway sideways while driving, endangers other road users and can lead to an accident. The article deals with the influence of the load position on the lateral oscillations of the trailer.

Keywords: cargo, car, train, trailer, stability.

AUTORIŲ LYDRAŠTIS

Autoriaus vardas, pavardė: Kastytis Laurinaitis.

Mokslo laipsnis ir vardas: daktaras

Darbo vieta ir pozicija: VšĮ Kauno technikos kolegijos, Inžinerijos mokslų fakulteto, Autotransporto elektronikos studijų programos departamento lektorius.

Autoriaus mokslinių interesų sritys: technologijos mokslai, aplinkos inžinerija.

Telefonas ir el. pašto adresas: 8 685 79730 kastytis.laurinaitis@edu.ktk.lt

Autoriaus vardas, pavardė: Tatjana Sokolova.

Mokslo laipsnis ir vardas: daktaras

Darbo vieta ir pozicija: VšĮ Kauno technikos kolegijos, Inžinerijos mokslų fakulteto, Autotransporto elektronikos studijų programos lektorė.

Autoriaus mokslinių interesų sritys: technologijos mokslai, transporto technologijos.

Telefonas ir el. pašto adresas: 8 677 03782, tatjana.sokolova@edu.ktk.lt

A COVER LETTER OF AUTHORS

Author name, surname: Kastytis Laurinaitis.

Science degree and name: doctor

Workplace and position: Kaunas University Of Applied Engineering Sciences, Faculty of Engineering sciences, Lecturer, Department of Automotive Electronic Study Program.

Author 's research interests: technological sciences, Environmental engineering.

Telephone and e-mail address: 8 685 79730 kastytis.laurinaitis@edu.ktk.lt

Author name, surname: Tatjana Sokolova.

Science degree and name: doctor

Workplace and position: Kaunas University Of Applied Engineering Sciences, Faculty of Engineering sciences,
Lecturer, Department of Automotive Electronic Study Program

Author 's research interests: technological sciences, transport technologies

Telephone and e-mail address: 8 677 03782, tatjana.sokolova@edu.ktk.lt

MAŽIAUSIO DETALIŲ, EFEKTYVIAI APDIRBAMŲ CNC TEKINIMO STAKLĖMIS, SKAIČIAUS PARTIJOJE NUSTATYMAS

Laimutis Stankevičius, Vadim Mokšin
Vilniaus Gedimino technikos universitetas

Anotacija

Straipsnyje pateikiami detalės apdirbimo operacijų, atliekamų CNC ir įprastinėmis tekinimo staklėmis, pagalbinių laikų chronometražo rezultatai. Remiantis chronometražo rezultatais buvo apskaičiuoti ir palyginti vienetiniai kalkuliaciniai apdirbimo operacijų, atliekamų CNC ir įprastinėmis tekinimo staklėmis, laikai. Tyrimui atlikti buvo naudojami trys skirtingi detalės apdirbimo programos parengimo būdai: renkant nuo staklių pulto kodų eilutėmis, naudojant CAM programinę įrangą ir naudojant CNC staklių valdiklio vedlio tipo programą. Buvo nustatyta, kad CNC tekinimo staklės gali būti efektyviai panaudotos individualioje arba smulkių serijų gamyboje, kai detalių skaičius partijoje svyruoja nuo 1 iki 4 vienetų, priklausomai nuo detalės apdirbimo programos rengimo būdo ir įrankio derinimo būdo.

Reikšminiai žodžiai: įprastinės tekinimo staklės, CNC tekinimo staklės, pagalbinis operacijos laikas, chronometražas, vienetinis kalkuliacinis laikas.

Įvadas

Kompiuterinio valdymo arba CNC (angl. *Computer Numerical Control*) stakles ilgą laiką buvo įprasta naudoti tik serijinėje gamyboje, nes tik jos sąlygomis buvo galima išnaudoti visą šių staklių potencialą (Braziūnas, 2004; Marcinkevičius et al., 2010; Basturk, 2009). Taip buvo todėl, kad valdymo programų sudarymas buvo gana sudėtingas ir laiko imlus procesas, be to, daug laiko reikėjo sugaišti pačių staklių paruošimui darbui pagal parengtą programą. Dėl to, o taip pat dėl didelės CNC staklių kainos, mažos įmonės ir dirbtuvės pasirinkdavo įprastines (rankinio valdymo) stakles. Serijinėje gamyboje CNC staklės puikiai tiko, nes gaminamos gana didelės vienetų detalių partijos ir staklių nereikėjo dažnai perderinti (Braziūnas, 2004).

XX amžiaus pabaigoje kompiuterinių technologijų proveržis atvėrė naujas CNC staklių panaudojimo galimybes. Kompiuterinės technikos bei įrangos matmenys ir kaina smarkiai sumažėjo, o patikimumas padidėjo. Atsirado naujų informacijos nešėjų, valdymo programų rengimas supaprastėjo, ištobulėjo CAM (angl. *Computer Aided Manufacturing* arba kompiuterinė gamyba) sistemos (Schaeede et al., 2018) bei vaizdinio programavimo technologijos. Sparčiai tobulėjo ir staklių modulinis dizainas (Shneor, 2018). Šiuo metu bet kokias kompiuterinio valdymo stakles galima lengvai pritaikyti individualiems klientų poreikiams atsisakius arba užsisakius tam tikras parinktis (pavyzdžiui, tas pats tekinimo staklių modelis gali būti užsakomas dviejų, trijų arba net keturių ašių), dėl to išaugo šių staklių panaudojimo lankstumas ir sumažėjo kaina. Gausus gamintojų siūlomas papildomos CNC staklių įrangos pasirinkimas (drožlių konvejeriai, automatinio ruošinių pakrovimo/iškrovimo sistemos, įrankių būklės stebėjimo sistemos ir pan.) leido CNC staklėms įgyti didelį pranašumą prieš įprastines stakles. Įvertinus šias sąlygas, CNC staklės tampa vis patrauklesnės ir mažoms, vienetinius gaminius gaminančioms įmonėms bei dirbtuvėms (Nallusamy, 2016). Pagrindiniai CNC staklių pranašumai, lyginant jas su įprastinėmis staklėmis, yra tokios (Marcinkevičius et al., 2010):

- pastovaus pjovimo greičio palaikymas tekinimo staklėse: CNC staklės gali automatiškai keisti suklio sūkius, atsižvelgiant į įrankio viršūnės padėtį detalės spindulio atžvilgiu, tokiu būdu mažiau dyla įrankis ir užtikrinama geresnė paviršiaus kokybė;
- galimybė programuoti įrankio judesį keliomis ašimis vienu metu, dėl to galima apdirbti sudėtingo profilio detales nenaudojant brangių fasoninių įrankių ir šablonų;
- operatoriui nereikia stebėti apdirbimo proceso, atsiranda galimybė aptarnauti kitas stakles, kol vienos dirba pagal programą;
- staklių darbo zona uždaryta apdirbimo metu, todėl galima naudoti didelio slėgio aušinimo sistemas;
- žymiai greitesni įrankių pagalbiniai judesiai (šiuolaikinėse CNC staklėse greitojo įrankio pozicionavimo judesio greitis siekia 50 m/min), dėl to mažėja pagalbinis operacijos laikas.

CNC staklių tobulinimas tapo vienu iš pagrindinių veiksnių, leidžiančiu pakelti gamybos automatizacijos lygį. To priežastis yra didelės šių staklių gamybos automatizavimo galimybės. Šiuolaikinės CNC staklės leidžia integruoti įvairius robotus, konvejerius, automatines ruošinių tiekimo bei detalių keitimo sistemas bei įrankio priežiūros sistemas ir sujungti jas į vieną programiškai valdomą sistemą. Tai leidžia CNC stakles efektyviai naudoti ir masinėje gamyboje, kur žmonės dažniausiai tik prižiūri gamybą, bet tiesiogiai nedalyvauja procesuose.

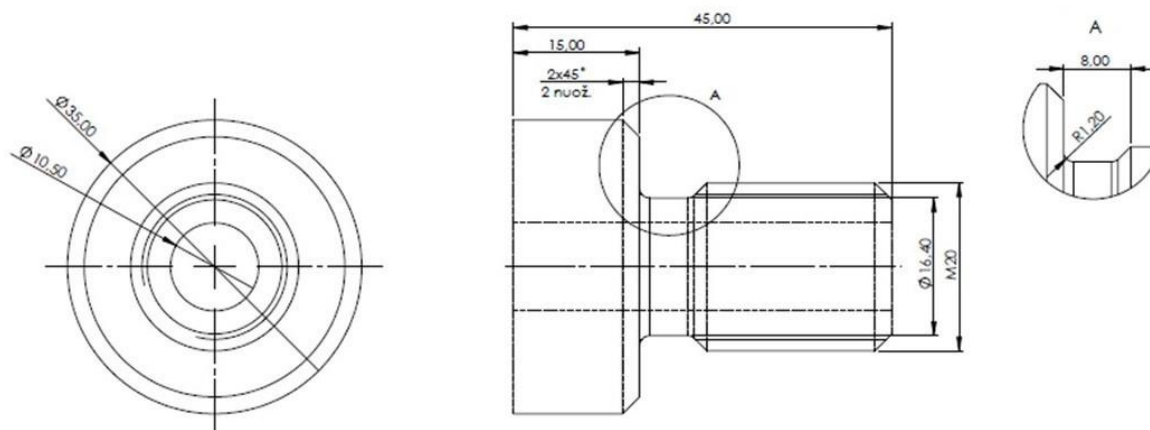
Pagrindinis CNC staklių trūkumas, kuris stabdo jų plėtrą vienietinėje gamyboje yra valdymo programų parengimas. Plati skirtingų apdirbamų detalių nomenklatūra bei maži vienetų detalių kiekiai partijose

reikalauja dažno apdirbimo programų rengimo bei jų pakeitimo. Dažnai programa parengiama vienai detalei, ji pagaminama, o toliau ta programa nenaudojama, nes reikia apdirbti kitą detalę. Dėl to smarkiai padidėja laikas, reikalingas programoms ruošti (operatoriui įvedant programą prie CNC staklių pulto, staklėmis dažniausiai neapdirbami ruošiniai, jos stovi), o kartu mažėja našumas bei efektyvumas. Siekiant sumažinti laiko nuostolius, atsirandančius rengiant programas, kai kurie CNC staklių gamintojai pasiūlė dvejopo valdymo CNC stakles, kurias galima valdyti tiek programiškai, tiek rankiniu būdu. Tokiu būdu nesudėtingoms detalėms galima nerengti programų, o apdirbti panašiai, kaip įprastinėmis staklėmis. Kitas šios problemos sprendimas yra CNC staklių valdymo programų generavimas naudojant CAM programas pagal CAD (angl. *Computer Aided Design* arba kompiuterinis projektavimas) terpėje sudarytus 3D detalių modelius. Nepaisant to, mažos gamybos ar remonto įmonės dažnai neturi pakankamai išteklių leisti sau turėti inžinierių ir nusipirkti tokią programinę įrangą, o staklių operatoriai neturi reikiamos kvalifikacijos naudotis tokiomis programomis.

Kita vertus, naudoti CNC staklių gamintojų valdiklius valdymo programoms rengti nėra toks sudėtingas ir daug laiko reikalaujantis procesas, koks gali pasirodyti. Šiuolaikinės CNC staklės turi didelius ekranus, patogias klaviatūras. Dauguma CNC staklių gamintojų siūlo savo sukurtą vaizdinio programavimo įrangą – vedlius, kurie palengvina programų rengimo procesą. Tarp tokių galima paminėti JAV CNC staklių gamintojo HAAS Automation Inc. VQC (angl. *Visual Quick Code*) vedlį (HAAS Visual Quick Code, 2020).

Tyrimo objektas ir metodika

Tyrimui pasirinkta detalė, kurią galima pagaminti ir įprastinėmis, ir CNC tekinimo staklėmis (1 pav.). Detalės apdirbimui buvo panaudoti penki įrankiai: rupaus išorinio tekinimo peilis (C-formos plokštelė), išorinio griovelio tekinimo peilis (V-formos plokštelė), išorinio sriegio tekinimo peilis M20 sriegio apdirbimui, Ø10.5 mm grąžtas ir nupjovimo peilis. Detalė buvo apdirbama iš strypinio ruošinio tokia seka: galo tekinimas, išorinio profilio tekinimas, griovelio tekinimas, sriegio tekinimas, skylės gręžimas ir detalės atpjovimas.



1 pav. Detalės eskizas
Šaltinis: sudaryta autorių

Detalės apdirbimo operacijos pagalbiniam laikui chronometruoti buvo naudojamos įprastinės tekinimo staklės 16K20 ir 3-jų valdomų ašių (X, Z ir C) tekinimo centras HAAS ST-20 (2 pav.).



1 pav. Įprastinės tekinimo staklės 16K20 (kairėje) ir HAAS Automation Inc. firmos CNC tekinimo centras ST-20 (dešinėje)

Detalės apdirbimo operacijos vienetinis kalkuliacinis laikas apskaičiuojamas pagal formulę (Bražiūnas, 2004):

$$T_{v.k.} = \frac{T_{par.b.}}{n} + T_{maš.} + T_{pag.} + T_{pap.}, \quad (1)$$

čia $T_{v.k.}$ – vienetinis kalkuliacinis laikas, min, $T_{par.b.}$ – parengiamasis ir baigiamasis laikas, reikalingas susipažinti su detalės brėžiniu, įtvirtinti įrankius, perduoti apdirbtas detales kokybės kontrolei it pan., min, n – detalių skaičius partijoje, $T_{maš.}$ – mašininis (pagrindinis) laikas, min, $T_{pag.}$ – pagalbinis laikas, min, $T_{pap.}$ – papildomas laikas, skirtas darbo vietos priežiūrai, papildomam poilsui ir gamtiniams žmogaus poreikiams (imamas 6% nuo $(T_{maš.} + T_{pag.})$), min.

Imama, kad mašininis detalės apdirbimo laikas yra tas pats apdirbant tiek CNC, tiek įprastinėmis tekinimo staklėmis. CNC tekinimo staklių parengiamasis ir baigiamasis laikas yra didesnis, lyginant su įprastinėmis tekinimo staklėmis, kadangi CNC staklėms reikia parengti valdymo programą ir suderinti įrankius. Tačiau pagalbinis operacijos laikas apdirbant CNC staklėmis bus mažesnis dėl greitesnio įrankių pozicionavimo ir išankstinio įrankių pririšimo. Pagalbinis operacijos, atliekamos CNC staklėmis, laikas susideda iš tokių veiksmų:

- ruošinio užspaudimo/atleidimo;
- revolverinės galvutės atitraukimų į įrankio keitimo poziciją;
- įrankių keitimų;
- greitųjų įrankių pozicionavimų į apdirbimo pradžios tašką;
- greitųjų įrankio pozicionavimų tarp darbinių eigių;
- papildomų įrankių pririšimų staklių Z ašies kryptimi, jeigu operatorius dirba be ruošinio atramos (X ašies įrankių ilgių kompensacijos tekinimo staklėse nesikeičia).

Kai kurie CNC tekinimo staklių pagalbinio laiko komponentai buvo gauti iš skaičiavimų, kai kurie chronometruojant aukščiau aprašytus procesus. Įrankių keitimo laikas (revolverinės galvutės pasukimas per vieną poziciją) buvo gautas chronometruojant ir yra lygus 0,8 s. HAAS ST-20 CNC tekinimo centro greitojo pozicionavimo greitis Z ir X ašimis yra vienodas ir yra lygus 24 m/min. Buvo išmatuojami atstumai tarp įrankio keitimo pozicijos ir apdirbimo pradžios taškų bei tarp atskirų eigių pradžios ir pabaigos taškų, toliau buvo apskaičiuojami pagalbiniai laikai, reikalingi įrankiui pristesti ir atitraukti.

Įprastinių tekinimo staklių pagalbinis laikas susideda iš tokių veiksmų:

- ruošinio užspaudimo/atleidimo;
- pastūmos ir suklio greičio nustatymų svirtimis;
- suklio/pastūmos variklio įjungimų/išjungimų;
- įrankių keitimų peilių įtvare;
- įrankių pagreintųjų privedimų/atitraukimų prie/nuo ruošinio;
- įrankio lėtų privedimų iki prisilietimo su ruošiniu;
- pjovimo gylio nustatymo naudojant smagratį;
- tepimo ir aušinimo skysčio siurblio įjungimo/išjungimo.

Pagalbinis operacijos, atliekamos įprastinėmis tekinimo staklėmis, laikas buvo nustatomas tik chronometruojant.

Valdymo programos CNC staklėms sudarymo laikas buvo nustatomas chronometruojant. Buvo taikomi tokie trys skirtingi apdirbimo programos rengimo būdai: programa įvedama atskiromis kodų eilutėmis CNC staklių valdymo pulto klaviatūra; programa sudaroma naudojantis EdgeCAM[®] CAM programine įranga; programa sudaroma naudojantis HAAS Automation Inc. firmos VQC vedliu.

Mašininis detalės apdirbimo laikas buvo apskaičiuotas EdgeCAM[®] CAM programine įranga pagal parinktus iš įrankių gamintojų katalogų pjovimo režimo elementus. Mašininis laikas buvo imamas tas pats apdirbant tiek CNC, tiek įprastinėmis tekinimo staklėmis.

Detalių partijos apdirbimo laikas naudojant CNC tekinimo stakles buvo apskaičiuojamas naudojant patobulintą formulę (1):

$$T_{CNC} = T_{par.b.} + T_{prog.} + T_{der.} + n(T_{maš.} + T_{pag.}^{CNC} + T_{pap.}), \quad (2)$$

čia $T_{prog.}$ – detalės apdirbimo programos parengimo laikas, min, $T_{der.}$ – įrankių derinimo laikas, min, $T_{pag.}^{CNC}$ – pagalbinis operacijos, atliekamos CNC staklėmis, laikas, min.

Atitinkamai, detalių partijos apdirbimo įprastinėmis tekinimo staklėmis laikas buvo apskaičiuojamas naudojant tokią formulę:

$$T_{IPR} = T_{par. b.} + n(T_{maš.} + T_{pag.}^{IPR} + T_{pap.}), \quad (3)$$

čia $T_{pag.}^{IPR}$ – pagalbinis operacijos, atliekamos įprastinėmis tekinimo staklėmis, laikas, min.

Imama, jog komponentai $T_{par. b.}$, n ir $T_{maš.}$ yra tie patys tiek CNC, tiek įprastinėms tekinimo staklėms. Parengiamasis ir baigiamasis laikas buvo paimtas iš normatyvų (Marcinkevičius, 2001) ir yra lygus $T_{par. b.} = 20$ min.

Tyrimų rezultatai

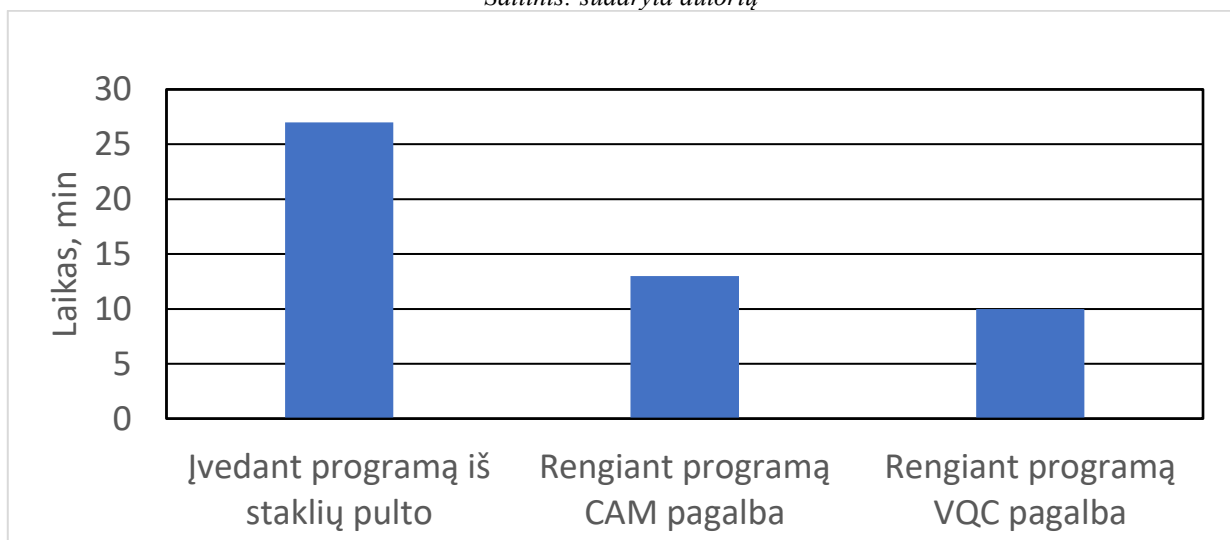
Detalės apdirbimui CNC staklėmis G ir M kodų kalba parengta programa pavaizduota 3 pav. Valdymo programos parengimo skirtingais būdais laikai pateikti 4 pav. Šie laikai, į kuriuos taip pat įeina laikai, skirti vaizdinei programos patikrai, gauti chronometruojant. EdgeCAM[®] terpėje sudarytas technologinis apdirbimo kelias su įrankių judesių trajektorijomis pavaizduotas 5 pav. 3D detalės modelis prieš tai buvo suprojektuotas naudojant SolidWorks[®] CAD programinę įrangą.

Iš 4 pav. pateikto grafiko galima matyti, kad detalės valdymo programos parengimo laikas sumažėja per pusę, kai programai rengti naudojama CAM programinė įrangą (3D detalės modelis buvo sukurtas naudojant CAD programą ir jo sukūrimo laikas į šį laiką įtrauktas nebuvo). Naudojant VQC vedlį, programos rengimo laiką galima sumažinti 2,7 karto, lyginant su įprastiniu programavimu (įrašant kodų eilutes prie CNC staklių pulto). Reikia paminėti, kad VQC taikymas yra apribotas sudarytų detalių šablonų kiekiu. Tačiau, staklių operatoriai gali kurti savo šablonus ir naudoti VQC kartu su įprastiniu programavimu. Pavyzdžiui, sriegio tekinimas gali būti atliekamas naudojant VQC, o kitos programos dalys parengtos rankiniu būdu įvedant kodus iš pulto klaviatūros.

% O00001 G21 G18 G54 G50 S3000 G28 U0. T707 (GALINIS TEKINIMAS) S1000 M03 G00 Z0 X44. G96 S350 M08 G01 X-2. F0.2 G00 Z2. X44. (ISORINIO PROFILIO TEKINIMAS) G71 D2.5 I1. K1. P1 Q2	N1 G00 G42 X12. G01 X20. Z-2. Z-30. X31. X35. Z-32. Z-50. N2 X44. G40 G28 U0. M09 T606 (GRIOVELIO TEKINIMAS) G00 Z-24. X24. M08 G01 G42 X22. Z-21. F0.08 X20. Z-22. X16.4 W-2. Z-28.75	G02 X18.9 Z-30. R1.25 G01 X25. G40 G00 X50. Z-20. M09 G00 U0. G97 S1600 T505 (SRIEGIMAS) G00 Z5. X22. M08 G76 A60 D0.3 F2.5 K1.525 Z-24. X16.95 P1 G28 U0. M09 T404 (GREZIMAS) S2700 G00 Z2. X0. M08	G01 Z-50. F0.18 G00 Z2. M09 G28 U0 T303 (NUPJOVIMAS) G00 Z-48. X44. G96 S120 M08 G01 X8. F0.15 G00 X44. M09 G28 U0 G28 W0 G97 S1500 M30 %
--	---	--	---

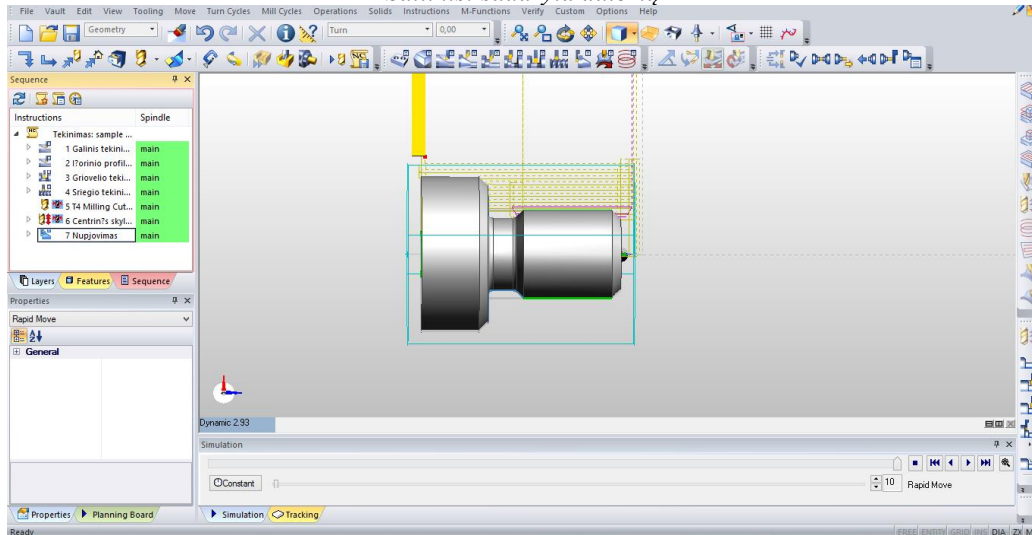
2 pav. CNC staklių valdymo programa

Šaltinis: sudaryta autorių



3 pav. CNC staklių valdymo programos parengimo skirtingais būdais laikai

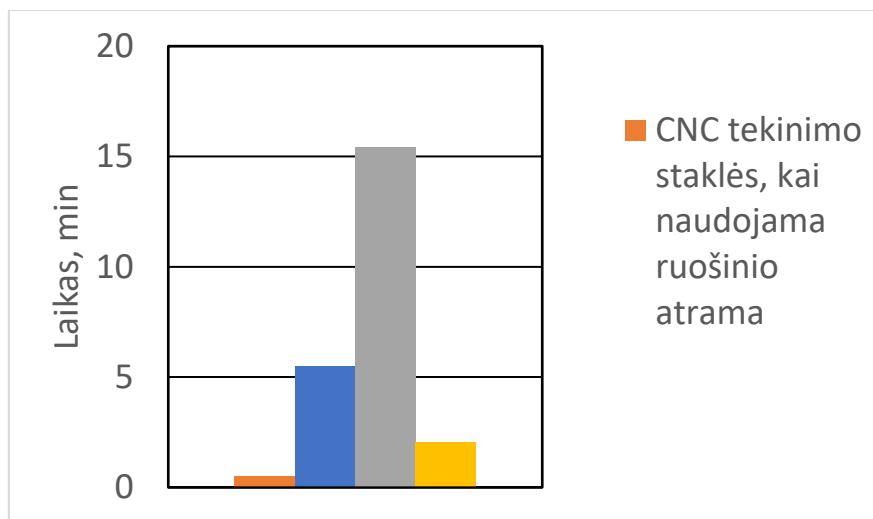
Šaltinis: sudaryta autorių



4 pav. Detalės ir ruošinio modeliai EdgeCAM® terpėje, spalvotomis linijomis pavaizduotos įrankių judėjimo trajektorijos

Šaltinis: sudaryta autorių

Detalės apdirbimo operacijos, atliekamos CNC ir įprastinėmis tekinimo staklėmis, pagalbiniai laikai pateikti 6 pav. Mažiausias pagalbinis laikas buvo gautas, kai apdirbimui CNC tekinimo staklėmis buvo naudojama ruošinio atrama. Šiuo atveju, nereikia iš naujo pririšti įrankių staklių Z ašies kryptimi kiekvieną kartą pakeitus ruošinį. Įrankio pririšimas yra daugiausiai pagalbinio laiko reikalaujantis veiksmas apdirbant CNC staklėmis. Reikia maždaug vienos minutės pririšti įrankį vienos ašies atžvilgiu. Mašininis laikas buvo imamas tas pats apdirbant tiek CNC, tiek įprastinėmis tekinimo staklėmis. Jis buvo gautas naudojant EdgeCAM® programinę įrangą ir yra lygus 2 minutėms ir 3 sekundėms arba 2,05 minutės (6 pav.).

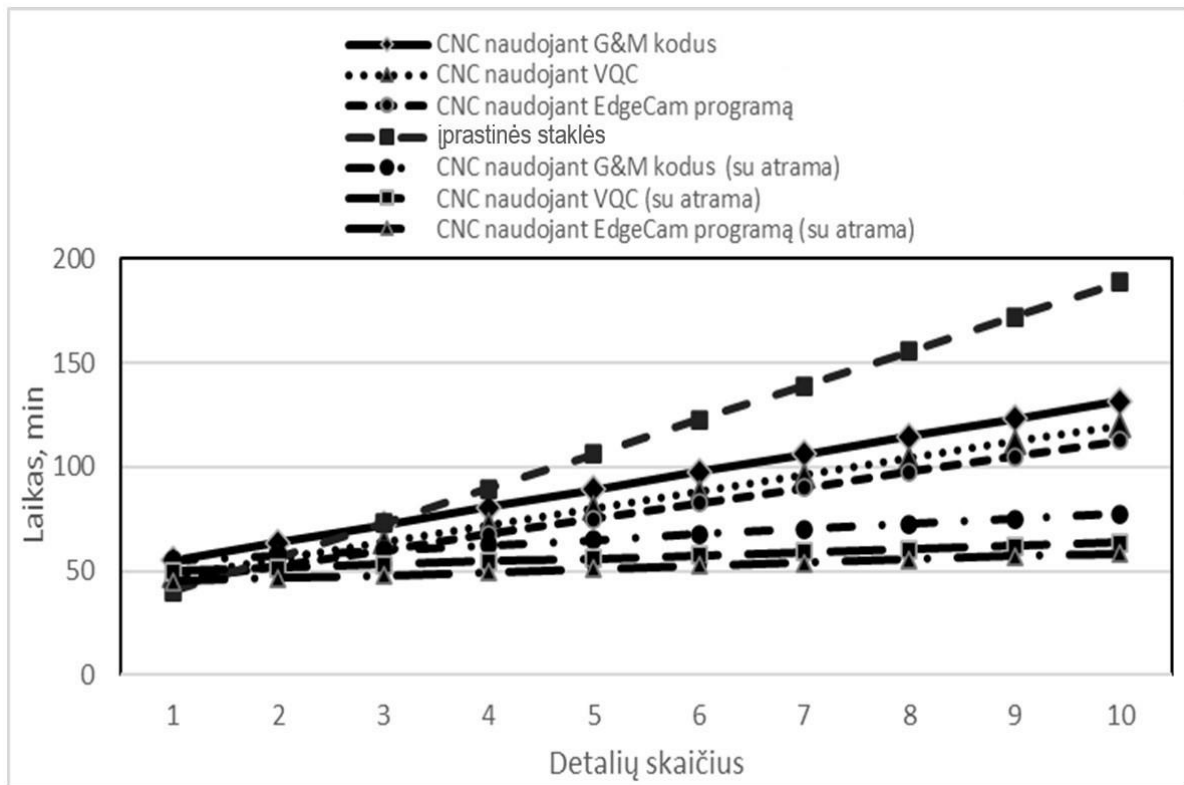


5 pav. Detalės apdirbimo operacijos pagalbiniai bei mašininis laikai

Šaltinis: sudaryta autorių

Grafinė formulių (2) ir (3) interpretacija pateikta 7 pav. Iš jo galima matyti, kad mažiausias detalių skaičius partijoje yra artimas 1, kai naudojama CAM programinė įranga ir ruošinio atrama. Naudojant CAM programinę įrangą, programavimo laikas nėra įtraukiamas į parengiamąjį ir baigiamąjį laiką, kadangi programa parengiama inžinieriaus-technologo atskiroje darbo vietoje, o ne prie CNC staklių. Įrankių tvirtinimo ir programos vaizdinės patikros laikai yra įtraukiami į parengiamąjį ir baigiamąjį laiką. Jeigu staklių valdymo programa yra rengiama rankiniu būdu (įvedant kodų eilutes CNC staklių valdymo pulte) ir ruošinio atrama staklių Z ašies kryptimi nenaudojama, partijos dydis turi būti mažiausiai 4 detalės, norint jas apdirbti greičiau negu įprastinėmis staklėmis. Jeigu naudojama ruošinio atrama, nereikia pririšti įrankių Z ašies kryptimi

pakeitus ruošinį. Šiuo atveju, mažiausias detalių skaičius partijoje sumažėja iki 3 vienetų. Naudojant VQC vedlį, mažiausias detalių skaičius partijoje yra lygus 2, jeigu naudojama ruošinio atrama – šiek tiek didesnis už 1.



6 pav. Apdirbimo laiko priklausomybės nuo detalių skaičiaus partijoje grafikas
Šaltinis: sudaryta autorių

Išvados

CNC tekinimo staklės, esant vienetinės gamybos sąlygoms, gali būti efektyviai panaudotos, kai detalių skaičius partijoje svyruoja nuo 1 iki 4 vienetų, priklausomai nuo valdymo programos rengimo metodo pasirinkimo ir įrankių derinimo sąlygų. CAM programos ir ruošinio atramos naudojimas gali sumažinti mažiausią detalių skaičių partijoje, kuriam esant galima efektyviai naudoti CNC stakles. Taip pat naudinga naudoti vaizdinio programavimo sistemas kuriant savo šablonus tipinėms detalėms apdirbti.

Literatūra

1. Basturk, S. 2009. Computer aided program generation for a laser cutting machine. *Journal of Naval Science and Engineering*, 5(2), 75–88.
2. Bražiūnas, A.J. 2004. Mašinų gamybos technologijos pagrindai. Kaunas: Technologija.
3. HAAS Visual Quick Code [interaktyvus] 2020. [žiūrėta 2020 m. birželio 1 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.haascnc.com/productivity/control/vqc.html>.
4. Marcinkevičius, A.H. 2001. Production technology of machines and instruments: Methodical instructions and data for laboratory tests and course project. Vilnius: Technika.
5. Marcinkevičius, A.H., Mokšis, V., Jurevičius, M. 2010. Šiuolaikiniai skaitmeninio valdymo apdirbimo centrai ir jų programavimas. I dalis: Apdirbimo centrai. Vilnius: Technika.
6. Nallusamy, S. 2016. Enhancement of productivity and efficiency of CNC machines in a small scale industry using total productive maintenance. *International Journal of Engineering Research in Africa*, 25, 119–126.
7. Schaefer, C., Seifermann, S., Metternich, J. 2018. Automated generation of CNC programs for manufacturing of individualized products. *Procedia CIRP*, 72, 1251–1257.
8. Shneor, Y. 2018. Reconfigurable machine tool: CNC machine for milling, grinding and polishing. *Procedia Manufacturing*, 21, 221–227.

DETERMINATION OF THE MINIMUM NUMBER OF PARTS IN A BATCH THAT CAN BE EFFECTIVELY MACHINED BY CNC LATHE

Summary

This paper presents motion-time study results of auxiliary times of machining operations performed by conventional and CNC lathes. Based on the motion-time study results, the times per piece of machining operations performed by CNC and conventional lathes were calculated and compared. Three different ways of preparing a CNC part program were used in the research: inputting program blocks from CNC lathe control unit, using CAM software and using a CNC lathe wizard-type programming software. It has been found that depending on the method of preparing a part program and the method of tool setup, CNC lathes can be used effectively in individual or small batch production when the number of parts in a batch ranges from 1 to 4 units.

Keywords: conventional lathe, CNC lathe, auxiliary time, motion-time study, time per piece.

AUTORIŲ LYDRAŠTIS

Autoriaus vardas, pavardė: Laimutis Stankevičius

Mokslo laipsnis ir vardas: inžinerijos mokslų bakalauras

Darbo vieta ir pozicija: VšĮ Vilniaus Gedimino technikos universiteto, Mechanikos fakulteto, Mechanikos ir medžiagų inžinerijos katedros magistrantas

Autoriaus mokslinių interesų sritys: medžiagų apdirbimas pjovimu

Telefonas ir el. pašto adresas: 8 5 2370594, laimutis.stankevicius@stud.vgtu.lt

Autoriaus vardas, pavardė: Vadim Mokšin

Mokslo laipsnis ir vardas: daktaras, profesorius

Darbo vieta ir pozicija: VšĮ Vilniaus Gedimino technikos universiteto, Mechanikos fakulteto, Mechanikos ir medžiagų inžinerijos katedros profesorius

Autoriaus mokslinių interesų sritys: tribologija, medžiagų apdirbimas pjovimu, mašinų dinamika

Telefonas ir el. pašto adresas: 8 5 2370594, vadim.moksin@vgtu.lt

A COVER LETTER OF AUTHORS

Author name, surname: Laimutis Stankevičius

Science degree and name: bachelor of engineering

Workplace and position: Vilnius Gediminas technical university, Faculty of mechanics, Department of mechanical and material engineering, M. Sc. student

Author's research interests: metal cutting

Telephone and e-mail address: 8 5 2370594, laimutis.stankevicius@stud.vgtu.lt

Author name, surname: Vadim Mokšin

Science degree and name: Ph. D., professor

Workplace and position: Vilnius Gediminas technical university, Faculty of mechanics, Department of mechanical and material engineering, professor

Author's research interests: tribology, metal cutting, machine dynamics

Telephone and e-mail address: 8 5 2370594, vadim.moksin@vgtu.lt

SIJOS DEVIACIJŲ NUSTATYMAS TAIKANT ĮVAIRIUS METODUS

Jurijus Tretjakovas^{1,2}, Audrius Čereška^{1,2}

¹Vilniaus Gedimino technikos universitetas, ²Vilniaus technologijų ir dizaino kolegija

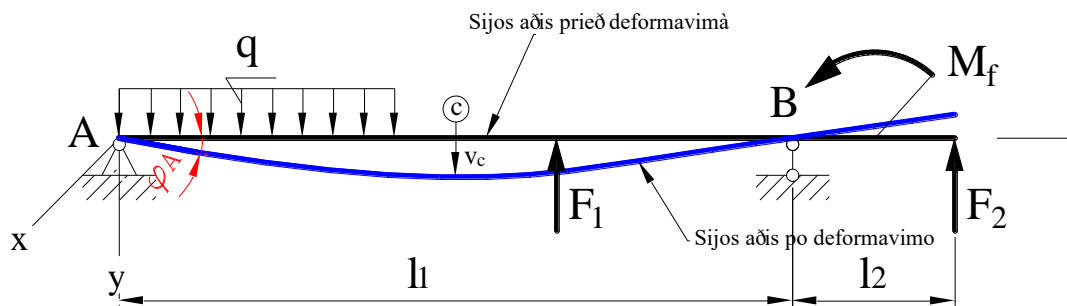
Anotacija.

Dviatramės sijos, dviejuose guoliuose įtvirtintos ašys ir vienu metu lenkiami ir sukami velenai yra dažniausiai mechanikos, aeronautikos, transporto ir statybos inžinerijose pasitaikantys elementai. Tokių elementų skaičiuojamoji analizė dažnai grindžiama remiantis ne tik stiprumo sąlyga, bet ir standumo ir stabilumo reikalavimais. Dviatramių sijų standumas aprašomas poslinkiais – įlinkiais ir deviacijomis, kurie gali būti skaičiuojami įvairiais metodais. Straipsnyje parodytas įvairių būdų praktinis pritaikymas, skaičiuojant dviatramės sijos deviaciją ties atrama. Pateikti panaudotų būdų trūkumai ir privalumai.

Reiškiniai žodžiai: sija, sijos deviacija, sijos modelis, Moro metodas, grafoanalitinis metodas.

Įvadas

Sijos deformacijas būtina žinoti skaičiuojant sijų standumą ir skaičiuojant statiškai neišsprendžiamus lenkimo uždavinius. Sijos kreivumas ir nutolusių nuo centrinio neutraliojo sluoksnio išilginių sluoksnių deformacija yra susiję su sijoje atsirandančiais normaliniais įtempiais. Išlinkusioje sijoje atsiranda skerspjūvio susikirtimo su neutraliuoju sluoksniu taškų poslinkiai – išilginės ašies taškai pasilenka statmenai ašiai (1 pav. ašies y) kryptimi, o skerspjūviai pasisuka apie neutraliąją liniją (1 pav. kampas φ_A). Statmenas ašiai taško pasislinkimas vadinamas įlinkiu, o skerspjūvio kampinis pasisukimas – deviacija [1-3]. Sijos pjūvio ties kairiąja atrama deviacija φ_A pavaizduoti raudonai nagrinėjami koordinačių xyz sistemoje (1 pav.).



1 pav. Pjūvio ties kairiąja atrama deviacija φ_A

Sijų deviacijų skaičiavimo būdų yra įvairių [1-3, 6]:

- įlinkių diferencialinės kreivės lygties sprendimas;
- Moro metodas;
- grafoanalitinis metodas Moro integralui išspręsti;
- tipinės žinytų formulės;
- skaičiuojamųjų programų (tame tarpe ir komercinių) naudojimas;
- modeliavimas skaitiniais metodais (baigtinių elementų metodas, baigtinių skirtumų metodas, diskrečiųjų elementų metodas ir kt.).

Darbe pateikta dažniausiai naudojamų metodų analizė parodant jų privalumus ir trūkumus.

Tyrimo objektas - dviatramė sija su konsole.

Tyrimo tikslas – pritaikyti įvairias skaičiavimo metodologijas fiziškai ir geometriškai tiesinei dviatramei sijai su konservatyviomis apkrovomis.

Šiam tikslui pasiekti buvo iškelti tokie uždaviniai:

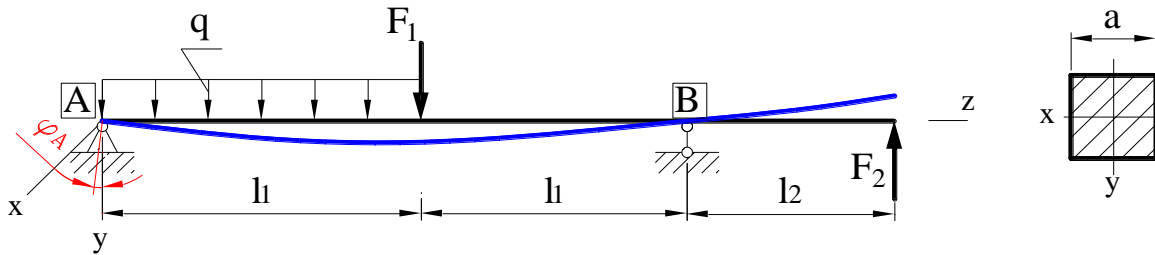
1. Sugeneruoti tamprią dviatramę stačiakampio skerspjūvio sija su konsole.
2. Sudaryti įlinkių kreivės diferencialinę lygtį ir ją išsprendus nustatyti pjūvio ties kaire atrama deviaciją.
3. Apskaičiuoti deviaciją taikant Moro integralą.
4. Skaičiuoti deviaciją naudojant grafoanalitinį metodą.
5. Gauti deviacijos išraišką naudojant tipines formules ir superpozicijos principą.
6. Pritaikyti vieną iš skaičiuojamųjų programų deviacijai skaičiuoti.

Tyrimo metodika.

Dviatramės sijos poslinkių tyrimas atliekamas analitiniu ir grafoanalitiniu metodais [7].

Sijos schema, išorinės apkrovos ir skaičiuojamoji schema

Analizuojamos dviatramės sijos su konsole schema pateikta 2 pav. Ji yra stačiakampio skerspjūvio $b \times h$, visas ilgis yra tarpatramio ir konsolės suma ($2l_1 + l_2$), sija apkrauta dviem koncentruotomis jėgomis F_1 ir F_2 ir tolygiai išskirstytu krūviu q ruože tarp atramų ilgyje l_1 .



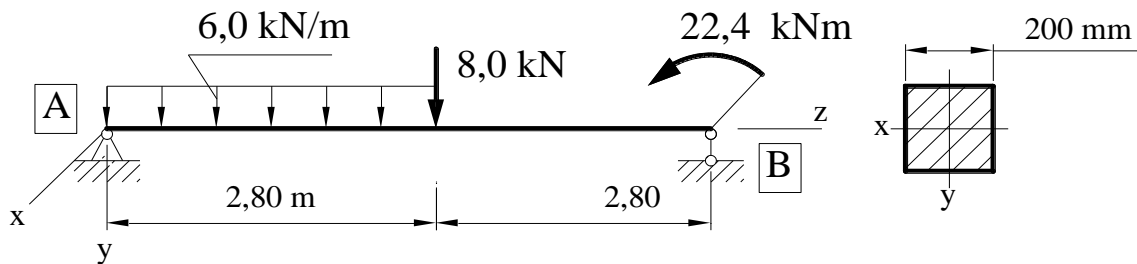
2 pav. Dviatramės sijos su konsole schema

Sprendžiamas fiziškai ir geometriškai tiesinis uždavinys sijos be nuosavojo svorio deviacijai φ_A ties kaire atrama nustatyti. Dviatramės sijos skaičiuojamieji parametrai: ilgiai $l_1=2,8$ m ir $l_2=1,4$ m, jėgos $F_1=8,0$ kN ir $F_2=16$ kN, tolygiai išskirstytas linijinis krūvis $q=6,0$ kN/m.

Sija supaprastinta atsisakius konsolės ir pridėjus koncentruotą momentą M_f prie dešiniojo paslankaus lanksto B. Pridėto koncentruoto momento skaičiuojamoji išraiška:

$$M_f = F_2 \cdot l_2 = 16,0 \cdot 1,4 = 22,4 \text{ kNm} \quad (1)$$

Šis momentas pridėtas prieš laikrodžio rodyklės kryptį. Sijos skaičiuojamoji schema pateikta 3 pav.



3 pav. Dviatramės sijos skaičiuojamoji schema

Sijos medžiaga - metalas, tamprumo modulis $E = 140$ GPa.

Sijos kvadratinio skerspjūvio parametras $a=200$ mm naudojamas skerspjūvio inercijos momentui apskaičiuoti:

$$I_x = \frac{a^4}{12} = \frac{0,20^4}{12} = 133 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4 \quad (2)$$

Pasinaudojus statinės pusiausvyros lygtis apskaičiuotos atramų A ir B reakcijų jėgos (F_{rA} pateikta 4 pav.).

Sijos įlinkių kreivės diferencialinė lygtis ir sprendimas

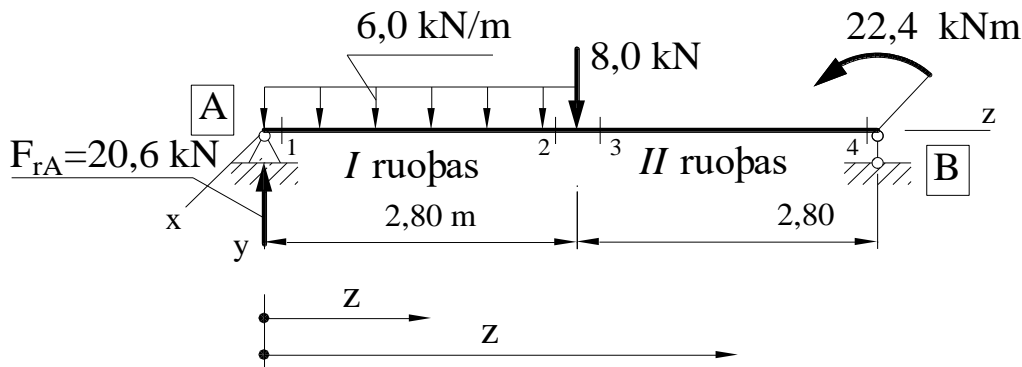
Įlinkių kreivės diferencialinė lygtis sprendžiama ją integruojant, todėl tam tikrais atvejais šis metodas vadinamas integravimo metodu [3]. Tai gana plačiai pasaulinėje praktikoje naudojamas metodas, teoriškai aprašomas ir taikomas [5]. Dviatramės sijos deviacijai nustatyti taikytas integravimo metodas. Tačiau mokomojoje literatūroje pateikiami tik elementarūs gmbinių sijų pavyzdžiai [2, 3].

Diferencialinė įlinkių kreivės lygtis tokia:

$$E \cdot I_x \cdot \frac{d^2 v}{dz^2} = -M(z) \quad (3)$$

čia $M(z)$ – lenkimo momento funkcija nuo koordinatės z .

Nagrinėjamos sijos atveju diferencialinė lygtis užrašyta dviem ruožams, nes jų perėjime (t.y. mazge 23) pakinta funkcijos analitinė išraiška. Ruožas 12 vadinamas pirmuoju (I), o ruožas 34 vadinamas antruoju (II) (4 pav.).



4 pav. Dvitramės sijos ruožai: pirmasis 12 ir antrasis 34

Sijos koordinatę z skaičiuota nuo kairiojo sijos galo (atramos A), tai lenkimo momento išraiška: Ruožui 12 kai $0 \leq z \leq 2,8$:

$$M(z) = 20,6 \cdot z - 6,0 \cdot z \cdot \frac{z}{2} = 20,6 \cdot z - 3,0 \cdot z^2 \quad (4)$$

Ruožui 34 kai $2,8 \leq z \leq 5,6$:

$$M(z) = 20,6 \cdot z - 6 \cdot 2,8 \cdot \left(z - \frac{2,8}{2} \right) - 8,0 \cdot (z - 2,8) = -4,2 \cdot z + 45,9 \quad (5)$$

Diferencialinės įlinkių kreivės lygtys tokios:

$$12 \text{ ruožui } E \cdot I_x \cdot \frac{d^2 v}{dz^2} = 3,0 \cdot z^2 - 20,6 \cdot z \quad (6)$$

$$34 \text{ ruožui } E \cdot I_x \cdot \frac{d^2 v}{dz^2} = 4,2 \cdot z - 45,9 \quad (7)$$

Poslinkiams nustatyti lygtys (6 ir 7) integruotos du kartus:

$$12 \text{ ruožui } \begin{cases} E \cdot I_x \cdot \frac{dv}{dz} = \int (3,0 \cdot z^2 - 20,6 \cdot z) dz + C_1 & (8) \\ E \cdot I_x \cdot v = \int dz \int (3,0 \cdot z^2 - 20,6 \cdot z) dz + C_1 \cdot z + D_1 & (9) \end{cases}$$

$$34 \text{ ruožui } \begin{cases} E \cdot I_x \cdot \frac{dv}{dz} = \int (4,2 \cdot z - 45,9) dz + C_2 & (10) \\ E \cdot I_x \cdot v = \int dz \int (4,2 \cdot z - 45,9) dz + C_2 \cdot z + D_2 & (11) \end{cases}$$

Panaudojus matematinį paketą Matchcad [4] gautos keturios nediferencialines lygtys su keturiomis nežinomomis integravimo konstantomis. Lygtyse pirmoji įlinkio išvestinė dv/dz pakeista deviacija φ .

$$E \cdot I_x \cdot \varphi_I = z^3 - 10,3 \cdot z^2 + C_1 \quad (12)$$

$$E \cdot I_x \cdot v_I = 0,25 \cdot z^4 - 3,43 \cdot z^3 + C_1 \cdot z + D_1 \quad (13)$$

$$E \cdot I_x \cdot \varphi_{II} = 2,1 \cdot z^2 - 45,9 \cdot z + C_2 \quad (14)$$

$$E \cdot I_x \cdot v_{II} = 0,7 \cdot z^3 - 23 \cdot z^2 + C_2 \cdot z + D_2 \quad (15)$$

Integravimo konstantoms C_1, C_2, D_1, D_2 nustatyti užrašytos keturios kraštinės sąlygos:

- 1) kai $z = 0$, tuomet pirmojo pjūvio įlinkis $v_1 = 0$;
- 2) kai $z = 2,8$, tuomet lygios antrojo ir trečiojo pjūvio deviacijos $\varphi_2 = \varphi_3$;
- 3) kai $z = 2,8$, tuomet lygūs antrojo ir trečiojo pjūvio įlinkiai $v_2 = v_3$;
- 4) kai $z = 5,6$, tuomet ketvirtojo pjūvio įlinkis $v_4 = 0$.

Taikant lygčių sistemą (12-15) ir kraštines sąlygas gauta:

$$0,25 \cdot z^4 - 3,43 \cdot z^3 + C_1 \cdot z + D_1 = 0 \quad (16)$$

$$z^3 - 10,3 \cdot z^2 + C_1 = 2,1 \cdot z^2 - 45,9 \cdot z + C_2 \quad (17)$$

$$0,25 \cdot z^4 - 3,43 \cdot z^3 + C_1 \cdot z + D_1 = 0,7 \cdot z^3 - 23 \cdot z^2 + C_2 \cdot z + D_2 \quad (18)$$

$$0,7 \cdot z^3 - 23 \cdot z^2 + C_2 \cdot z + D_2 = 0 \quad (19)$$

Keturių lygčių (16-19) sistemai su keturiais nežinomaisiais spęsti naudotas matematinis paketas Matchcad [4]. Sistemos supaprastintas algoritmas sprendinys su gautais sprendiniais pateiktas 5 pav.

$$\begin{array}{l}
 \text{Given} \quad + \\
 \mathbf{D1} = 0 \\
 53.31 + \mathbf{C1} - 1 \cdot \mathbf{C2} = 0 \\
 104.6 + 2.8 \cdot \mathbf{C1} + \mathbf{D1} - 2.8 \cdot \mathbf{C2} - 1 \cdot \mathbf{D2} = 0 \\
 -597.1 + 5.6 \cdot \mathbf{C2} + \mathbf{D2} = 0 \\
 \mathbf{Find}(\mathbf{D1}, \mathbf{C1}, \mathbf{C2}, \mathbf{D2}) = \begin{pmatrix} 0 \\ 61.29 \\ 114.6 \\ -44.67 \end{pmatrix} \\
 \text{Constants of integration:} \\
 \mathbf{D1} := 0 \quad \mathbf{C1} := 61.29 \quad \mathbf{C2} := 114.6 \quad \mathbf{D2} := -44.67
 \end{array}$$

5 pav. Sprendimo algoritmas ir sprendiniai

Deviacija skaičiuota iš 12 lygties, kai $z = 0$: $E \cdot I_x \cdot \varphi_I = 0^3 - 10,3 \cdot 0^2 + 61,29 = 61,29$;

$$\varphi_A = \frac{61,29 \cdot 10^3}{E \cdot I_x} = \frac{61,29 \cdot 10^3}{140 \cdot 10^9 \cdot 133 \cdot 10^{-6}} = 3,29 \cdot 10^{-3} \text{ rad} = 3,29 \text{ mrad} .$$

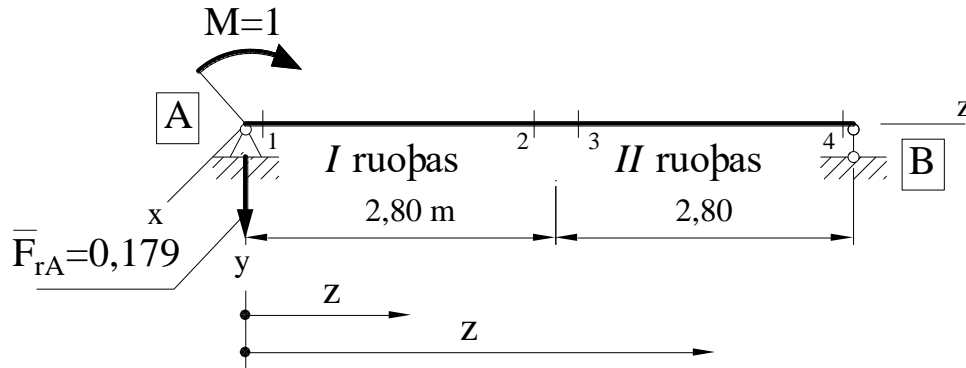
Moro būdas

Deviacija Moro būdu nustatyta apskaičiavus Moro integralą:

$$\varphi_i = \frac{1}{EI_x} \int_0^l (M \cdot \overline{M}_{i\varphi}) dz \quad (20)$$

čia M – lenkimo momento funkcija priklausanti nuo apkrovų; $\overline{M}_{i\varphi}$ – vienetinio lenkimo momento, atsirandančio sijoje dėl vienetinių apkrovų, pridėtų poslinkių kryptimis, funkcija.

Deviacijai skaičiuoti ties atrama A pridėtas momentas lygus bedimensiniam vienetui (6 pav.), jo sukeltų vienetinių momentų funkcija ruožuose 12 ir 34 tokia:



6 pav. Sija apkrauta vienetine jėga

Ruožui 12, kai $0 \leq z \leq 2,80$:

$$M(z) = -0,179 \cdot z + 1 \quad (21)$$

Ruožui 34 kai $2,80 \leq z \leq 5,60$:

$$M(z) = -0,179 \cdot z + 1 \quad (22)$$

Deviacija yra dviejų integralų suma:

$$\varphi = \sum_{j=1}^2 \frac{1}{(EI_x)_j} \int_0^{l_j} (M_j \cdot \overline{M}_{i\varphi}) dz \quad (23)$$

Deviacija:

$$\varphi_A = \frac{1}{EI_x} \left[\int_0^{2,8} (20,6 \cdot z - 3,0 \cdot z^2) \cdot (-0,167 \cdot z + 1) dz + \int_{2,8}^{5,6} (-4,2 \cdot z + 45,9) \cdot (-0,167 \cdot z + 1) dz \right]$$

Išsprendus integralus ir juos sudėjus gauta: $\varphi_A = \frac{61,3}{EI_x}$;

Deviacija apskaičiuota Moro būdu:

$$\varphi_A = \frac{61,3 \cdot 10^3}{E \cdot I_x} = \frac{50,7 \cdot 10^3}{140 \cdot 10^9 \cdot 133 \cdot 10^{-6}} = 2,28 \cdot 10^{-3} \text{ rad} = 3,28 \text{ mrad}$$

Deviacija skaičiuojant grafoanalitiniu metodu

Metodas pagrįstas tuo, kad Moro integralo ruože su tiesine vienetinio momento funkcija, integralas išreikštas taip:

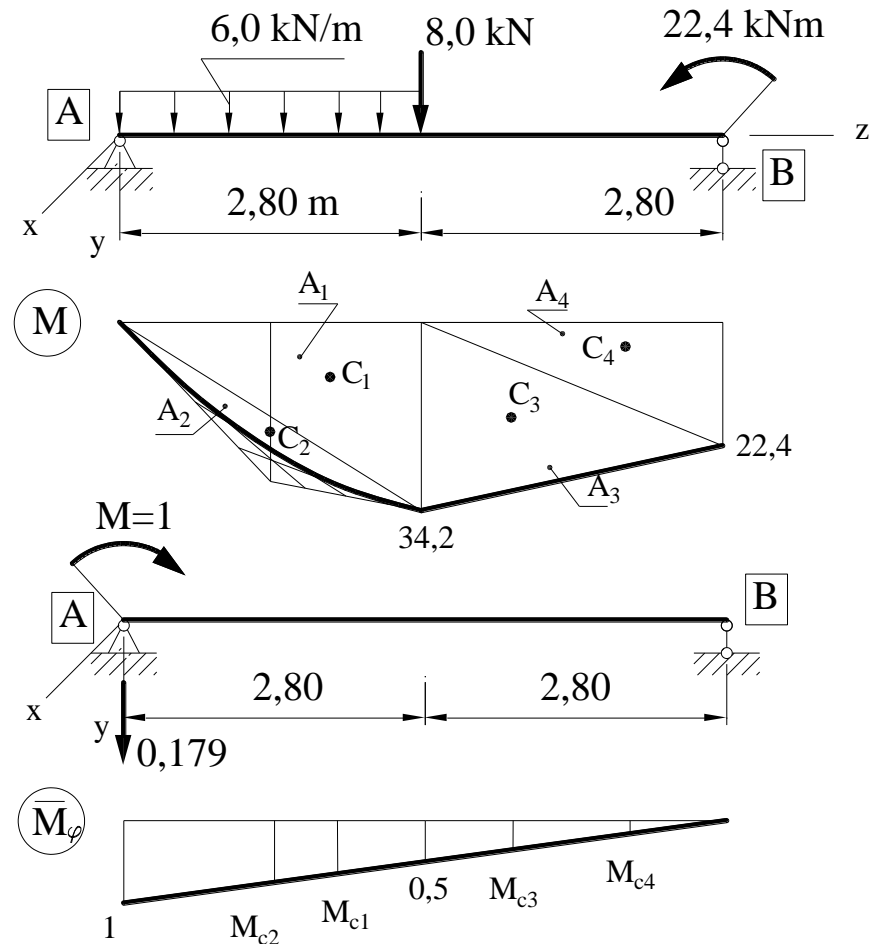
$$\int_0^l (M \cdot \overline{M}_i) dz = A_k \cdot \overline{M}_{cvi} \quad (24)$$

čia A_k - lenkimo momentų diagramos plotas; \overline{M}_{cvi} - ordinatė vienetinėje diagramoje ties ploto svorio centru.

Lenkimo momentų M diagramos ruožus galima suskaidyti į n elementariusius (trikampių ir parbolių nuopjovų) plotus. Nustačius, kad vienutinė momentų funkcija po elementariuoju plotu yra tiesinė, poslinkiai skaičiuoti pagal formulę:

$$\text{Deviacija } \varphi_i = \frac{1}{EI_x} \sum_{j=1}^n A_{kj} \cdot \overline{M}_{c\varphi ij} \quad (25)$$

Taikant statikos pusiausvyros lygtimis ir pjūvio metodu sudaryta sijos tikrųjų lenkimo momentų diagrama M ir vienutinio lenkimo momentų diagrama \overline{M}_φ (7 pav.).



7 pav. Sijos tikroji ir vienutinio momento lenkimo momentų diagramos

Deviacija:

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \frac{1}{EI_x} \sum_{j=1}^4 A_j \cdot \overline{M}_{c\varphi i} = \\ &= \frac{1 \cdot 10^3}{140 \cdot 10^9 \cdot 133 \cdot 10^{-6}} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot 34,2 \cdot 2,8 \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot 1 + \frac{2}{3} \cdot 0,5 \right) + \frac{6,0 \cdot 2,8^3}{12} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot 1 + \frac{1}{2} \cdot 0,5 \right) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} \cdot 34,2 \cdot 2,8 \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot 0,5 \right) + \frac{1}{2} \cdot 22,4 \cdot 2,8 \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot 0,5 \right) \right) = \frac{61,4 \cdot 10^3}{140 \cdot 10^9 \cdot 133 \cdot 10^{-6}} = 3,30 \cdot 10^{-3} \text{ rad} = 3,30 \text{ mrad} \end{aligned}$$

Superpozicijos metodas

Kai sijos deformavimasis vyksta fizinio ir geometrinio tiesiškumo ribose ir galioja superpozicijos principas, tuomet galima pritaikyti literatūroje [2, 3, 6] pateikiamas formules poslinkiams skaičiuoti.

Gauta deviacijos išraiška:

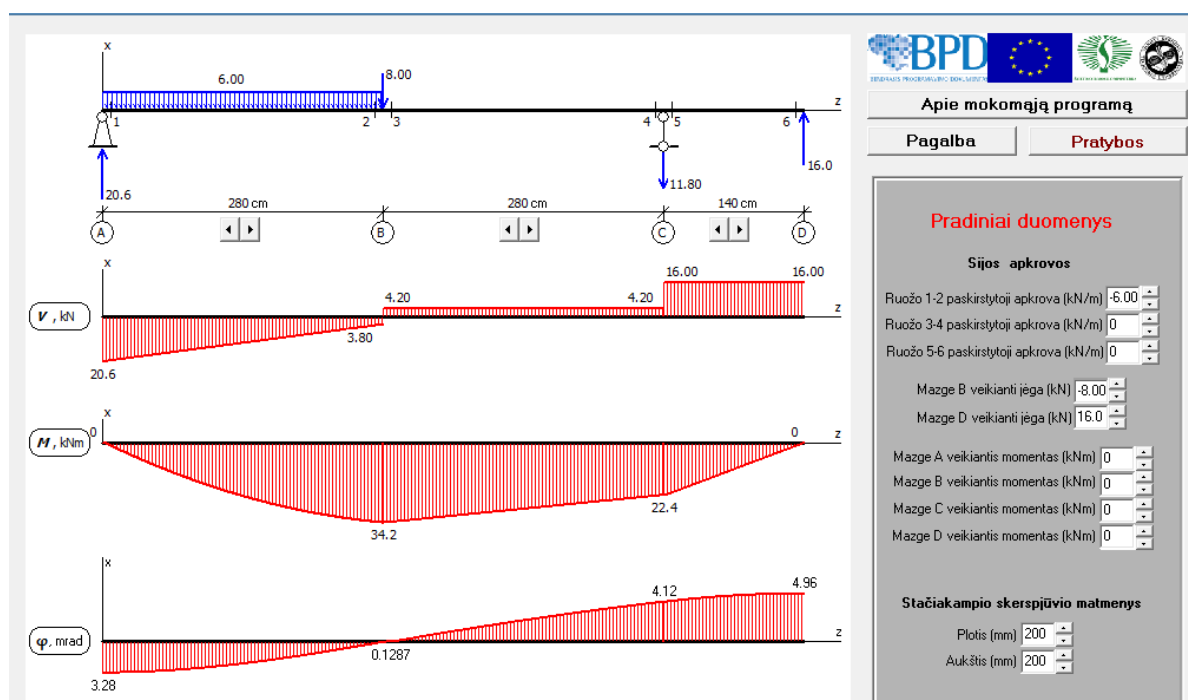
$$\varphi_A = \frac{1 \cdot 10^3}{140 \cdot 10^9 \cdot 133 \cdot 10^{-6}} \cdot \left(\frac{8,0 \cdot 5,6^2}{16} + \frac{6,0 \cdot 2,8^2 \cdot (5,6 + 2,8)^2}{24 \cdot 5,6} + \frac{22,4 \cdot 5,6}{6} \right) =$$

$$= \frac{61,29 \cdot 10^3}{140 \cdot 10^9 \cdot 133 \cdot 10^{-6}} = 3,29 \cdot 10^{-3} \text{ rad} = 3,29 \text{ mrad}.$$

Deviacija greičiausiai apskaičiuota taikant superpozicijos metodą, tačiau esant sudėtingai apkrovai ši metodą taikyti sudėtinga.

Įlinkio skaičiavimas skaičiuojamąja programa

Bet kokios skaičiuojamosios programos esmė yra konkrečios sijos geometrijos, skerspjūvio, medžiagos ir apkrovų apibūdinimas. Šiuo atveju naudota skaičiuojamoji programa [6], kuri parodyta 8 pav.



8 pav. Sijos modeliavimas skaičiuojamąja programa

Šioje programoje parodytos sijos įrąžų diagramos (skersinės jėgos V ir lenkimo momentai M) bei pasiskirstymo grafikas pavadintas raide φ . Grafike φ pirmojo pjūvio deviacija lygi 3,28 mrad.

Rezultatai

Sijos deviaciją apskaičiavus integravimo ir Moro metodais, grafoanalitiniu būdu ir naudojant formules ir modeliuojant skaičiuojamąja programa gautieji rezultatai pateikti 1 lentelėje.

1 lentelė. Deviacijos reikšmės

Metodas	Deviacija, mrad	Paklaida, %
Integravimo	3,29	0
Moro	3,28	0,3
Grafoanalitinis	3,30	0,3
Tipinės formulės	3,29	0
Skaičiuojamoji programa	3,28	0,3

Gautų rezultatų paklaidos skaičiuotas lyginant reikšmes su integravimo metodo gautu atsakymu.

Išvados

Atlikus dvitramės sijos su konsule deviacijos prie kairiosios atramos skaičiavimo būdų apžvalgą daromos tokios išvados.

Įlinkių kreivės diferencialinių lygčių sudarymas yra sudėtinga procedūra. Šių lygčių sprendimas be matematinio kompiuterinio įrankio pagalbos praktiškai neįmanomas. Integravimo būdas yra racionalus tik tuo atveju, kai reikia nagrinėti visą įlinkių kreivę arba nustatinėti daugelio sijos taškų deviacijas.

Moro būdu deviaciją skaičiuoti yra paprasčiau esant nesudėtingai apkrovai. Tačiau gaunama tik vieno pjūvio deviacijos reikšmė.

Skaičiuoti deviaciją grafoanalitiniu būdu galima, kai apkrova sudėtinga. Šiuo metodu galima apskaičiuoti bet kurio taško įlinkį, nes vienetinę jėgą galima pridėti prie bet kurio sijos pjūvio.

Tipines formules naudoti galima tik pritaikius superpozicijos principą. Jei apkrova sudėtingesnė arba reikia ieškoti netarpatraminio centrinio pjūvio (t. y., bet kurio kito pjūvio) įlinkio, šio metodo naudoti negalima.

Naudojant skaičiuojamąsias kompiuterines programas galima modeliuoti bet kokią siją.

Gautų rezultatų analizė parodė, kad paklaidos 0,3% (lyginant su integravimo metodo sprendiniu) inžineriniuose skaičiavimuose sprendiniui įtakos neturi.

Literatūra

1. Atkočiūnas, J., J. Nagevičius. Tamprumo teorijos pagrindai. Vilnius: Technika, 2004.
2. Čižas A. Medžiagų atsparumas. Konstrukcijų elementų mechanika. Vilnius: Technika, 1993.
3. Hibbeler R.C. Mechanics of Materials. Prentice Hall, 2011.
4. Maxfield B. Engineering with Mathcad. Butterworth-Heinemann is an imprint of ElsevierLinacre House, Jordan Hill, Oxford, Corporate Drive, Suite 400, Burlington, 2006.
5. Tretjakovas, J., Čereška, A. Sijos įlinkių nustatymas integravimo ir Moro metodais. Inžinerinės ir edukacinės technologijos ISSN 2029-9303, 2019, Nr. 2, 81-86 p.
6. Vislavičius, K. ir kt. Medžiagų atsparumo elektroninis vadovėlis. Vilnius, 2008.
7. Zienkiewicz, O.C., Taylor R.L. The Finite Element Method. The Basis. Vol. 1. Fifth edition, Butterworth Heinemann, Oxford, 2000.

EVALUATION OF THE BEAM DEVIATIONS USING VARIOUS METHODS

Summary

Double-girder beams, double-bearing axles, and simultaneously bent and rotating shafts are the most common elements in mechanical, aeronautical, transportation, and civil engineering. The computational analysis of such elements is often based on not only the strength condition but also the stiffness and stability requirements. The stiffness of two-span beams is described by displacements - deflections and deviations, which can be calculated by various methods. The paper shows the practical application of various methods for calculating the deviation of a two-span beam at a support. Disadvantages and advantages of the methods used are presented.

Key words: beam, beam deviation, beam model, Moro method, graph analytical method.

AUTORIŲ LYDRAŠTIS

Autoriaus vardas, pavardė: Jurijus Tretjakovas

Mokslo laipsnis ir vardas: daktaras, docentas

Darbo vieta ir pozicija: Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Statybos fakulteto, Taikomosios mechanikos katedros docentas

Autoriaus mokslinių interesų sritys: baigtinių elementų metodas, irimo mechanika

Telefonas ir el. pašto adresas: +370 686 21859, jurijus.tretjakovas@vgtu.lt

Autoriaus vardas, pavardė: Audrius, Čereška

Mokslo laipsnis ir vardas: daktaras, profesorius

Darbo vieta ir pozicija: Vilniaus Gedimino technikos universiteto, Mechanikos fakulteto, Mechanikos ir medžiagų inžinerijos katedros profesorius

Autoriaus mokslinių interesų sritys: mechaninių statinių ir dinaminių sistemų diagnostika ir monitoringas

Telefonas ir el. pašto adresas: +370 606 90514, audrius.cereska@vgtu.lt

A COVER LETTER OF AUTHOR

Author name, surname: Jurijus Tretjakovas

Science degree and name: doctor, associate professor

Workplace and position: Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering Faculty, Applied Mechanics Department associate professor

Author's research interests: finits elements method, fracture mechanic

Telephone and e-mail address: +370 686 21859, jurijus.tretjakovas@vgtu.lt

Author name, surname: Audrius, Čereška

Science degree and name: doctor, professor

Workplace and position: Vilnius Gediminas Technical University, Mechanics Faculty, Mechanical and material engineering department professor

Author's research interests: diagnostics and monitoring of static and dynamic mechanical systems

Telephone and e-mail address: +370 606 90514, audrius.cereska@vgtu.lt

GARSO ŠALTINIO LOKALIZAVIMO TIKSLUMĄ ĮTAKOJANČIŲ VEIKSNIŲ TYRIMAS

Saulius Sakavičius

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

Anotacija

Straipsnyje pristatoma teorinė garso šaltinio lokalizavimo tikslumą įtakančių faktorių analizė. Tyrimo tikslas – išsiaiškinti, kaip tiksliai galima lokalizuoti kambaryje vaikščiančio kalbėtojo kryptį, naudojant dviejų mikrofonų garso įrašų koreliaciją. Eksperimentiniams tyrimams naudoti garso įrašai iš viešai prieinamos duomenų bazės. Tyrimų metu išanalizuoti skirtingi signalą aprašantys požymiai, jų kitimas laike, gaunama kalbėtojo sekimo neapibrėžtis. Straipsnyje taip pat analizuojami skirtingo triukšmingumo signalai, filtravimo įtaka lokalizavimo rezultatams.

Reikšminiai žodžiai: garso šaltinio lokalizavimas, akustika, mikrofonų gardelė, skaitmeninis signalų apdorojimas, šaltinio krypties nustatymas.

Įvadas

Garso šaltinio lokalizavimas praktikoje neretai atliekamas nedidelių matmenų įtaisais, tokiais kaip aplinkos intelekto sistemos, išmanieji telefonai. Nors beaidėje patalpoje garso šaltinį lokalizuoti yra labai paprasta, tačiau tikslumas ženkliai mažėja realioje aplinkoje (Brandstein, 1997; Datum, 1996). Analizuojant garso bangas realioje aplinkoje tenka įvertinti papildomus girdimo ar įrašomo garso savybes įtakančius faktorius, tokius kaip: aplinkos akustinės savybės, lokalizavimo sistemos signalo-triukšmo santykis, signalo analizės langas, mikrofonų gardelės dydis ir sistemos diskretizavimo dažnis (Xiao, 2016).

Atlikus eksperimentinius tyrimus su realiais garso duomenimis (Lollmann, 2018), gautos garso šaltinio krypties nustatymo tikslumo priklausomybės, kuriomis buvo siekiama įvertinti įtaką šių pasirenkamų parametrų: diskretizavimo dažnio, perteklinio diskretizavimo koeficiento, kalbos aktyvumo detektoriaus tipo ir jo parametrų. Tyrimai parodė, kad garso šaltinio lokalizavimo tikslumui padidinti būtina atskirti mikrofonais gaunamų signalų segmentus su naudingumu signalu (kalbos) ir be jo, tokiu būdu išvengiant klaidingo šaltinio krypties nustatymo.

Garso šaltinio lokalizavimas atliekamas skaičiuojant tikėtiną šaltinio kampą su mikrofonų porą jungiančia atkarpa, analizuojant signalus, gaunamus dviejuose sinchronizuotuose mikrofonuose. Garso šaltinio lokalizavimo tikslumui įvertinti naudojamos viešai prieinamoje duomenų bazėje LOCATA (Lollmann, 2018) pateikiamos garso šaltinio koordinatės ir jų kitimas laike 120 Hz diskretizavimo dažniu.

Garso šaltinio lokalizavimas naudojant mikrofonų poros signalų koreliaciją

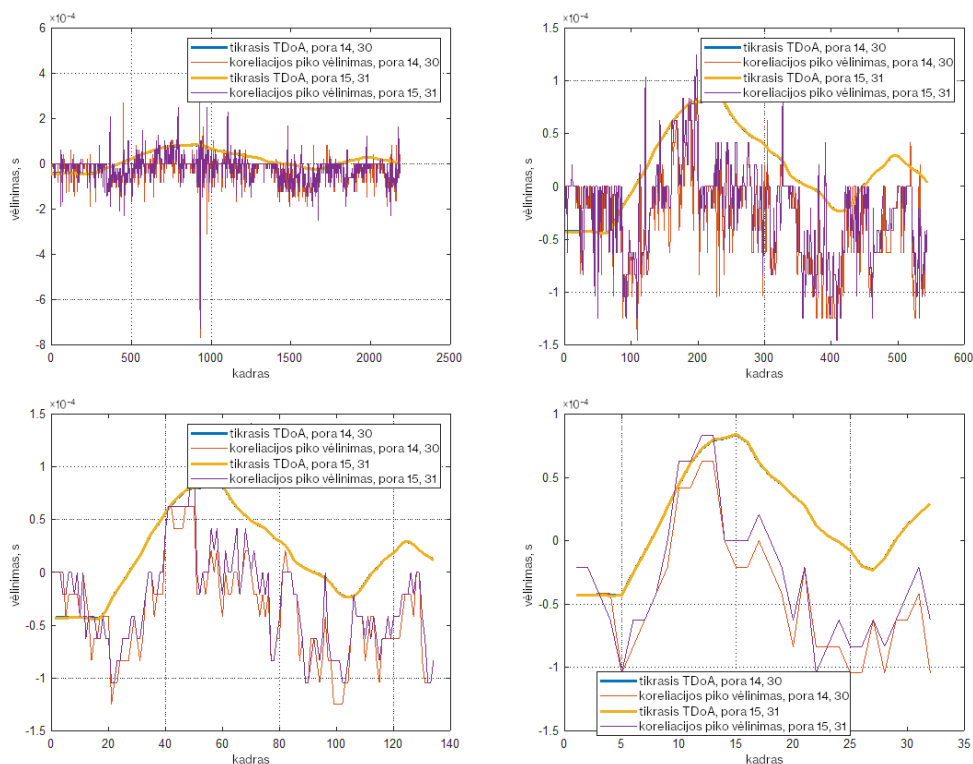
Tyrimo pirmojo etapo metu buvo siekiama vizualiai palyginti garso šaltinio vietą, gaunamą iš koreliacijos piko poslinkio ir tikrąją garso šaltinio vietą, apskaičiuota iš duomenų rinkinyje pateikto kalbėtojo koordinatinių kitimų. Tikrajai garso šaltinio vietai nustatyti buvo naudojamos kiekvieno iš mikrofonų koordinatės bei garso šaltinio koordinatės trimatėje erdvėje. Kadangi duomenų rinkinio įrašymo metu kalbėtojas (garso šaltinis) vaikščiojo kambaryje, o mikrofonų gardelė nejudėjo, racionalu buvo naudoti tik dvi koordinatas, ignoruojant vertikaliąją ašį. Garso bangos vėlinimas i -tajam mikrofonui ToA_i apskaičiuojamas kiekvienam mikrofonui pagal Pitagoro teoremą:

$$ToA_i = \sqrt{(x_s - x_{mi})^2 - (y_s - y_{mi})^2} / v_s, \quad (1)$$

čia x_{mi}, y_{mi} yra i -tojo mikrofono koordinatės, v_s – garso greitis. Apskaičiavę vėlinimo laiką abiemis mikrofonams galime apskaičiuoti vėlinimų skirtumą $TDoA_{ij}$, kuris turėtų sutapti su koreliacijos piko poslinkiu.

$$TDoA_{ij} = ToA_i - ToA_j. \quad (2)$$

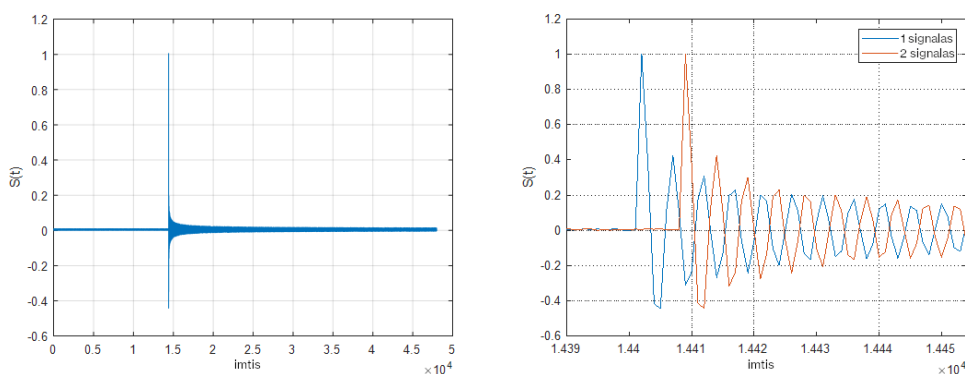
Tyrimo rezultatai (1 pav.) gauti taikant įvairaus ilgio signalo analizės kadrus. Tyrimo metu nebuvo taikomas kadrų išrinkimo algoritmas (pvz., pagal signalo ZCR (angl. *Zero Crossing Rate* – perėjimo per nulį sparta) ar STE (angl. *Short-Time Energy* – trumpo segmento energija)).



1 pav. Garso šaltinio lokalizavimo rezultatai taikant 1024, 4096, 16384 ir 65536 imčių ilgio kadrus

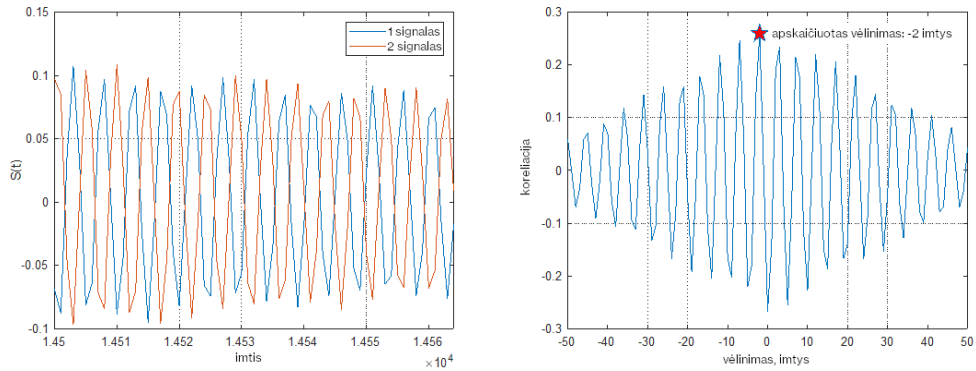
Kaip matyti iš pateiktų garso šaltinio judėjimo trajektorijos grafikų (1 pav.), vėlinimo laiko skirtumo nustatymo iš koreliacijos maksimumo poslinkio triukšmas mažėja analizės kadro ilgiui didėjant. Nepaisant to, paklaida išlieka nemaža.

Ilgesni analizės kadrai gali duoti tikslesnę vėlinimo laiko skirtumo įvertį, lyginant su trumpesniais kadrais. Tai galima paaiškinti. Įsivaizduokime, kad turime šaltinį, skleidžiantį signalą, kurio bangos ilgis yra mažesnis (vieną ar kelis kartus) už atstumą tarp dviejų imtuvų. Signalo amplitudė yra nepastovi – signalas turi tam tikrą neperiodinę (bent analizės kadro ribose) gaubtinę. Taip pat, galima sakyti, kad signale yra trumpalaikė pereinamoji dedamoji. Jei turime šaltinį, skleidžiantį signalą, kurio bangos ilgis yra mažesnis už atstumą tarp dviejų imtuvų, tuomet signalo amplitudė yra nepastovi – signalas turi tam tikrą neperiodinę gaubtinę (2 pav.).

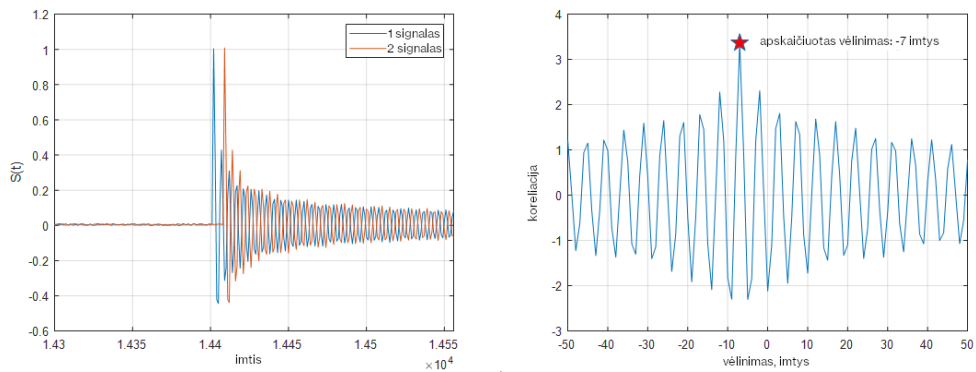


2 pav. Dviejuose mikrofonuose įrašytų vieno garso signalų palyginimas (skirtingi masteliai)

Apskaičiuodami koreliaciją 64 atskaitų trukmės analizės kadrai, gauname aiškų koreliacijos maksimumą, atitinkantį signalo vėlinimą (7 atskaitos). Tačiau į tokio pačio ilgio kadra gali ir nepatekti signalo perėjimas; tokiu atveju koreliacijos pikas gali būti gaunamas neteisingoje vietoje (ties neteisingu vėlinimu). Analizės kadro ilgis per mažas, kad būtų galima apskaičiuoti teisingą vėlinimų skirtumą iš gaubtinės kitimo, nes triukšmo amplitudė yra didesnė nei gaubtinės pokytis analizės lange (3 pav.). Signalų grafike matyti, kad signalų poslinkis vienas kito atžvilgiu yra apie 180 laipsnių, o iš tiesų daugiau (keli periodai).



3 pav. Mikrofonuose gaunamų signalų palyginimas ir jų koreliacijos rezultatas, kai naudojamas 64 atskaitų ilgio analizės kadras

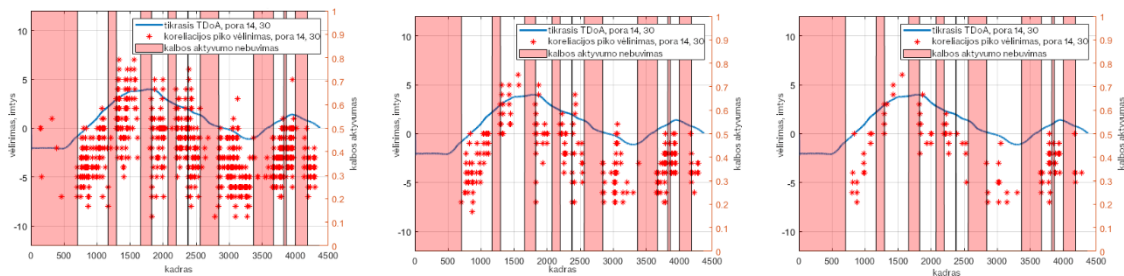


4 pav. Mikrofonuose gaunamų signalų palyginimas ir jų koreliacijos rezultatas, kai naudojamas 256 atskaitų ilgio analizės kadras

Jei pasirinktas analizės kadras yra ilgesnis, didėja tikimybė, kad į jį pateks perėjimas, signalo gaubtinės pokytis bus didesnis už triukšmo amplitudę. Taip gaunama gaubtinės įtaka koreliacijos rezultatui yra didesnė, nei triukšmo įtaka (4 pav.).

Garso šaltinio lokalizavimas pagal kalbos signalo įrašus

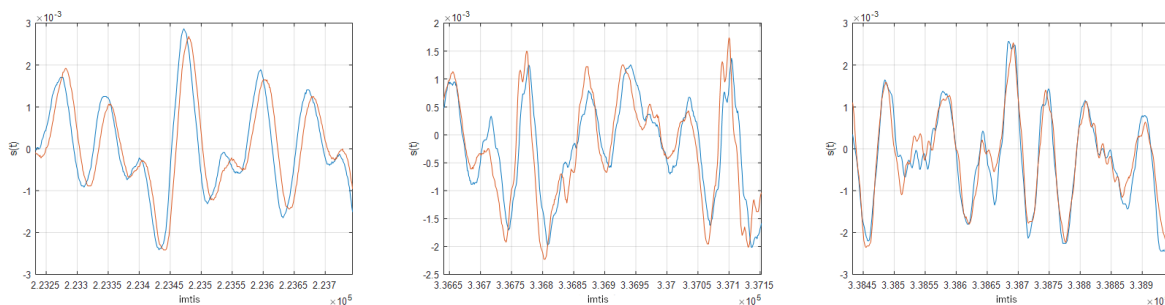
Kalbos signalas pasižymi kintančiomis savybėmis. Kai kuriuose žodžiuose pasitaiko fonemų, kurių signalo kitimas laike labai panašus į atsitiktinį triukšmą. Tyrimo metu buvo siekiama palyginti tikrąją garso šaltinio judėjimo trajektoriją su apskaičiuotąja iš koreliacijos ekstremumų. Rezultatų iliustracija pateikta 5 pav.



5 pav. Garso šaltinio padėties nustatymo nuokrypių iliustracijos pasirenkant skirtingas signalo ir triukšmo intervalų santykio ribas (2, 3 ir 5)

Analizuojant ir tarpusavyje lyginant dviejų mikrofonų įrašytų garso signalų amplitudžių kitimo panašumus ir skirtumus pastebėta, kad triukšmo įtaka mažos amplitudės signalui gali ženkliai įtakoti apskaičiuojama koreliacijos rezultata ir lemti netinkamą vėlinimo laikų skirtumo apskaičiavimą. Dėl šios

priežasties buvo nuspręsta ištirti, kaip garso šaltinio lokalizavimo tikslumas keičiasi koreliacijai pasirenkant tik tuos garso signalo kadrus, kuriuose santykis tarp signalo amplitudžių kitimo intervalo ir triukšmo amplitudžių kitimo intervalo viršija tam tikrą slenkstį: 2, 3 ar 5 kartus (5 pav.).



6 pav. Dviejų mikrofonų įrašytų signalų palyginimas skirtingose įrašo vietose

Nepaisant to, kad įvedus papildomą garso signalų kadrų atranką, garso šaltinio lokalizavimas šiek tiek pagerėjo, gaunama vis tiek per didelė neapibrėžtis (nuo vieno iki kelių dešimčių laipsnių). Šios situacijos priežastis iliustruoja kelių signalų analizės kadrų palyginimas skirtingose įrašo vietose (6 pav.). Iš paveikslų matyti, kad net didelės amplitudės signalai, su nedideliu amplitudinio triukšmo lygiu, gali lemti netinkamą vėlinimo laiko skirtumo nustatymą, priklausomai nuo to, kurioje signalo vietoje jis bus apskaičiuotas.

Išvados

Išanalizavus mikrofonų poroje gautų kalbos signalų įrašus matyti, kad net esant nedideliui 8 cm atstumui tarp dviejų mikrofonų, dėl kambario akustikos, kintančių laike signalų charakteristikų ir kitų iškreipimų, tikslus garso šaltinio lokalizavimas nėra įmanomas realiose sąlygose taikant signalų koreliaciją. Tyrimas parodė, kad atsižvelgdami į signalo kitimo intervalą ir palygindami jį su triukšmo kitimo intervalu, galime eliminuoti dalį klaidingų garso šaltinio lokalizavimo rezultatų, tačiau išlieka kito tipo triukšmai, dėl kurių signalų analizė laiko ašyje tampa neefektyvi.

Literatūra

1. Brandstein M. S., Silverman H. F. 1997. A robust method for speech signal time-delay estimation in reverberant rooms. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1: 375–378.
2. Datum M. S., Palmieri F., Moiseff A. 1996. An Artificial Neural Network for Sound Localization Using Binaural Cues. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 100(1): 372–383.
3. Lollmann H. W., Evers C., Schmidt A., Mellmann H., Barfuss H., Naylor P. A., Kellermann W. 2018. The LOCATA Challenge Data Corpus for Acoustic Source Localization and Tracking. *IEEE 10th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM)*, 1: 410–414.
4. Xiao X., Xu C., Zhang Z., Zhao S., Sun S., Watanabe S., Wang L., Xie L., Jones D. L., Chng E. S., Li H. 2016. A Study of Learning Based Beamforming Methods for Speech Recognition: 1–6.

INVESTIGATION OF FACTORS AFFECTING SOUND SOURCE LOCALIZATION

Summary

Paper presents the theoretical analysis of factors influencing the accuracy of sound source localization. The aim of the study was to find out which factors may increase the precision of sound source localization for a walking speaker using the correlation between two microphones' signals. Sound recordings from a publicly accessible database were used for experimental investigation. During the investigation, different characteristics describing the signal were analyzed, their variation in time and the uncertainty of the speaker tracking. The article also analyzes the signals of different noise, the influence of filtration on the sound source localization results.

AUTORIŲ LYDRAŠTIS

Autoriaus vardas, pavardė: Saulius Sakavičius.

Darbo vieta ir pozicija: VŠĮ Vilniaus Gedimino technikos universiteto, Elektronikos fakulteto Elektroninių sistemų katedros doktorantas.

Autoriaus mokslinių interesų sritys: garso inžinerija, akustika, intelektualiosios sistemos, garso signalų apdorojimas.

Telefonas ir el. pašto adresas: 8 621 76218, saulius.sakavicius@vgtu.lt

ISSN 2029-9303

INŽINERINĖS IR EDUKACINĖS TECHNOLOGIJOS
2020 Nr. 2

Lietuvių kalbos redaktorė **Sonata Paulauskienė**
Užsienio kalbos redaktorė **Judita Štreimikienė**

Tiražas 70 egz. 72 psl. Parengimo spaudai data 2020-12-28
Išleido Kauno technikos kolegija, Tvirtovės al. 35, LT-50155 Kaunas

www.ktk.lt

El.p. ktk@ktk.lt

Spausdino KTU spaustuvė/leidykla „Technologija“, Studentų g. 54, LT-51424 Kaunas

<http://ktu.edu/lt/leidykla>

El.p. leidykla@ktu.lt