

УДК 378.147

**Девін Владлен В'ячеславович**

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри загальнотехнічних дисциплін  
Подільський державний аграрно-технічний університет, м. Кам'янець-Подільський, Україна  
dvvkr.123@gmail.com  
ORCID: 0000-0003-2994-3144

**Ткачук Василь Сергійович**

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри загальнотехнічних дисциплін  
Подільський державний аграрно-технічний університет, м. Кам'янець-Подільський, Україна  
twsk@i.ua  
ORCID: 0000-0001-5414-2387

**Бурдега Василь Юрійович**

канд. техн. наук, доцент кафедри загальнотехнічних дисциплін  
Подільський державний аграрно-технічний університет, м. Кам'янець-Подільський, Україна  
burdega\_vasil@ukr.net

## **ВИКОРИСТАННЯ НЕКОМЕРЦІЙНОГО НАВЧАЛЬНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ СТЕРЖНЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ**

**Анотація.** Студенти технічних вищих закладів освіти, які вивчають дисципліни «Будівельна механіка», «Опір матеріалів», «Механіка матеріалів і конструкцій» на практичних заняттях і під час самостійної роботи розраховують на міцність різного роду стержневі конструкції. Як показує досвід викладання зазначених дисциплін, особливі труднощі у студентів викликає розрахунок саме статично невизначуваних стержневих систем. Це пов'язано з тим, що для розкриття статичної невизначеності окрім рівнянь рівноваги статички потрібно скласти додаткові рівняння сумісності деформацій. У статті розглянуто проблему підвищення якості підготовки інженерів технічних і будівельних спеціальностей засобами інформаційних технологій. Проведено огляд і аналіз декількох некомерційних навчальних комп'ютерних програм для розрахунку стержневих конструкцій. Пропонується методика використання цих програм в освітньому процесі викладачами і студентами технічних вищих закладів освіти для розрахунку статично-невизначуваних стержневих систем. Завдання дослідження полягає у виявленні можливостей інтенсифікації процесу навчання інженерів технічних і будівельних спеціальностей за допомогою використання некомерційного навчального програмного забезпечення. В тексті статті наводиться обґрунтування доцільності використання пропонованих програм під час вивчення дисциплін «Будівельна механіка», «Опір матеріалів», «Механіка матеріалів і конструкцій» студентами інженерно-технічних вищих закладів освіти. Програмне забезпечення використовується для того, щоб підтримувати і доповнювати теоретичні лекції, під час практичних занять, виступає в якості навчального додаткового інструменту для зміцнення знань, отриманих студентами. Доведено, що інформаційно-комп'ютерні технології навчання мають великий освітній і розвивальний потенціал, забезпечують максимальну активність учасників освітнього процесу, оптимальний час навчання і його результативність.

**Ключові слова:** будівельна механіка; опір матеріалів; механіка матеріалів і конструкцій; інформаційні технології; некомерційне програмне забезпечення.

**Постановка й обґрунтування актуальності проблеми.** Студенти технічних вищих закладів освіти, які вивчають дисципліни «Будівельна механіка», «Опір матеріалів», «Механіка матеріалів і конструкцій» на практичних заняттях і під час самостійної роботи розраховують на міцність різного роду стержневі конструкції. Як показує досвід викладання зазначених дисциплін, особливі труднощі у студентів викликає розрахунок саме статично невизначуваних стержневих систем. Це пов'язано з тим, що для розкриття статичної невизначеності окрім рівнянь рівноваги статички потрібно скласти додаткові

рівняння сумісності деформацій. Для успішного розв'язування статично невизначуваних задач вирішальне значення має правильне зображення ймовірної деформованої схеми конструкції, так як на її основі визначається напрямок зусиль у стержнях і складаються рівняння рівноваги. У разі невідповідності деформованої схеми конструкції дійсному напрямку сил, можна отримати неправильний результат. Використання некомерційного навчального програмного забезпечення в освітньому процесі дозволить подолати ці труднощі.

Проблема дослідження полягає у виявленні можливостей інтенсифікації процесу навчання інженерів технічних і будівельних спеціальностей за допомогою використання некомерційного навчального програмного забезпечення для розрахунку стержневих конструкцій LinPro [1], TwoDFrame [2], Ftool [3] і Mav.Structure [4].

**Аналіз основних досліджень. Виокремлення аспектів проблеми, які ще недостатньо вивчені.** Усі стержневі системи можна розділити на три типи: ферми, балки і рами. До ферм відносяться системи, що складаються зі стержнів, з'єднаних у вузлах шарнірами. Відмінною рисою ферми є те, що навантаження до ферми можна прикладати у вигляді зосереджених сил тільки до вузлів. Ферми одержали широке поширення як несучі конструкції на транспорті в мостових спорудженнях, у будівельній індустрії для перекриття великих прольотів при будівництві різних споруджень: промислових цехів, концертних і торговельних залів, ангарів, у машинобудуванні та ін.

Балками називаються стержневі конструкції, які зазнають дії поперечних навантажень, прикладених у вигляді зосереджених сил і моментів або розподілених навантажень у будь-якому перерізі балки в прольоті або на консолі. Балки є найбільш розповсюдженими конструкціями, які використовують у будівництві і машинобудуванні.

Рамою називається стержнева система, що складається зі стержнів, жорстко з'єднаних у вузлах. Жорстке з'єднання стержнів рами у вузлі не допускає взаємного повороту перерізів, що примикають до вузла. Конструкція рами дозволяє прикладати навантаження в будь-якому перерізі рами, як у вузлах, так і поза вузлами. Рамні системи одержали широке розповсюдження в промисловому і цивільному будівництві, у машинобудуванні, на транспорті, в авіа- і суднобудуванні тощо. Таким чином розрахунок і дослідження напружено-деформованого стану стержневих конструкцій має в інженерній практиці надзвичайно велике значення.

До особливого різновиду стержневих конструкцій відносяться статично-невизначувані системи. Це конструкції, зусилля в елементах яких неможливо визначити тільки з рівнянь статички і потрібно скласти додаткові рівняння сумісності переміщень вузлів.

У статично невизначуваних стержневих системах зусилля виникають не тільки від зовнішніх навантажень, але і в результаті неточності виготовлення окремих елементів системи, зміни температури елементів системи тощо. При відхиленні дійсних поздовжніх розмірів стержнів від номінальних (розрахункових) при складанні статично невизначуваних систем виникають додаткові, так звані монтажні зусилля і напруження. При зміні температури статично невизначуваної стержневої системи в її елементах виникають додаткові, так звані температурні зусилля і напруження.

Досвід показує, що особливі труднощі у студентів виникають під час визначення саме температурних і монтажних напружень.

При ручному розрахунку виникають значні обчислювальні ускладнення вже при ступеню статичної невизначності три і вище. Крім цього, зростає імовірність помилок при визначенні вантажних і одиничних переміщень, розв'язанні систем канонічних

рівнянь тощо. З розвитком інформаційно-комп'ютерних технологій з'явилася можливість деякі рутинні і громіздкі обчислювальні операції перекласти на електронну машину.

На теперішній час існує велика кількість різного програмного забезпечення для розрахунку стержневих конструкцій починаючи з простих програм розроблених викладачами технічних ВЗО до спеціалізованих професійних програм таких, як ЛИРА-САПР [5], SCAD Office [6], Robot Structural Analysis [7], RISA [8] тощо. Такого роду програми мають очевидні переваги з їх потужними можливостями і надійністю. Однак необхідно витратити чимало часу для того, щоби навчити студента працювати в цих програмах, які були розроблені для потреб досвідчених інженерів і експертів.

В той же час існує багато професійно зробленого некомерційного програмного забезпечення, яке має досить великі можливості в розрахунку стержневих конструкцій. Деякі з цих програм розроблені спеціально для освітнього процесу.

Одна з них – це програмний комплекс MDSolids [9], за допомогою якого можна розрахувати статично-невизначуваний брус на визначення монтажних і температурних напружень.

**Формулювання мети, постановка завдань.** Метою досліджень є обґрунтування доцільності використання некомерційного програмного забезпечення для розрахунку стержневих конструкцій, зокрема статично невизначуваних, під час вивчення дисциплін «Будівельна механіка», «Опір матеріалів», «Механіка матеріалів і конструкцій» студентами технічного вищого закладу освіти.

До завдань, які необхідно було розв'язати, увійшли:

- огляд, аналіз і визначення дидактичних можливостей некомерційного програмного забезпечення для розрахунку стержневих конструкцій;
- обґрунтування доцільності використання пропонованих комп'ютерних програм для розрахунку статично невизначуваних стержневих систем;
- показати нові можливості, які відкриваються у вирішенні комплексу методичних завдань із застосуванням зазначених програм.

**Виклад основного матеріалу з обґрунтуванням отриманих результатів.**

Як зазначалося раніше, в статично невизначуваних конструкціях зусилля і напруження можуть виникати не тільки від силового навантаження, а і від зміни температури і неточності виготовлення елементів після монтажу. Розрахунок конструкцій на силове навантаження передбачений в кожній з програм, а визначення температурних і особливо монтажних напружень можна проводити тільки в деяких із них.

З цих позицій інтерес представляє наступні некомерційні комп'ютерні програми для розрахунку стержневих конструкцій: LinPro, TwoDFrame, Ftool і Mav.Structure. До переваг даних програм, безсумнівно, можна віднести низькі вимоги до апаратного забезпечення, вузьку спеціалізацію і, що важливо, автори програм надають безкоштовну версію.

Інтерфейси згаданих програм та принципи роботи в них дуже подібні: за допомогою миші та панелі інструментів можна представляти розрахункові об'єкти, наприклад, ферми та рами, здійснювати динамічні зміни, фіксувати певні властивості, обчислювати значення поздовжніх і поперечних зусиль в стержнях, згинаючих моментів, деформацій тощо.

**LinPro** – це простий додаток для статичного і динамічного аналізу плоских стержневих конструкцій. Програма підтримує різні типи навантажень і дуже гнучка при створенні структури. У ній є майже все, що потрібно для лінійного статичного аналізу плоских стержневих конструкцій. В програмі передбачено два способи для

введення характеристик вузлів і стержнів – за допомогою миші і табличним методом за допомогою клавіатури.

За замовчуванням в програмі встановлені одиниці вимірювання кілоньютони і метри, можна встановити ньютони і сантиметри. Характеристики матеріалу стержнів і геометричні характеристики їх перерізів задаються в одному вікні, що є дуже зручним, окрім того існує можливість задати тільки розміри простих поперечних перерізів, таких як коло, прямокутник і програма сама обчислить площу і моменти інерції цих перерізів.

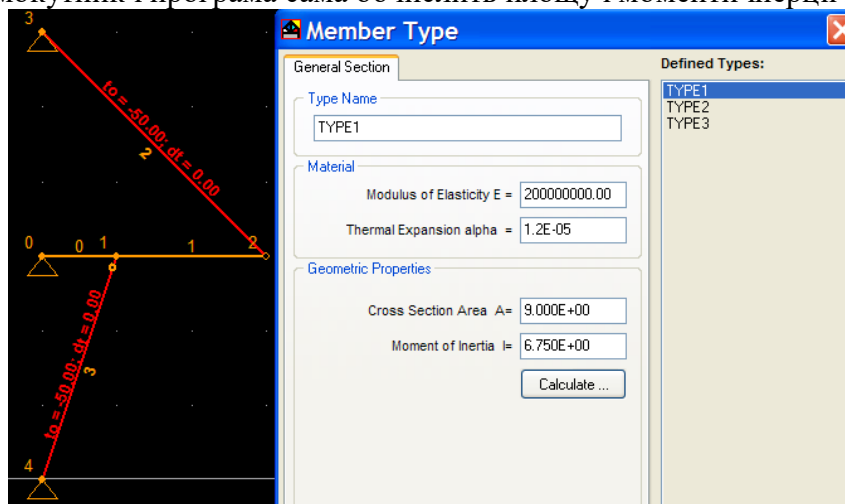


Рис. 1. Розрахункова схема стержневої конструкції в програмі LinPro

**Ftool** – це програма, призначена для навчання інженерного аналізу плоских стержневих конструкцій. Це проста аналітична програма, яка об'єднує в одному інтерфейсі ресурси для ефективного створення і управління моделлю (попередня обробка), пов'язану з швидким і ефективним кодом для візуалізації результатів (постобробка).

За час свого використання програма Ftool показала себе як відповідний інструмент для інженерних розрахунків і структурного аналізу бетонних і сталевих конструкцій на курсах Цивільного будівництва в кількох бразильських і зарубіжних університетах.

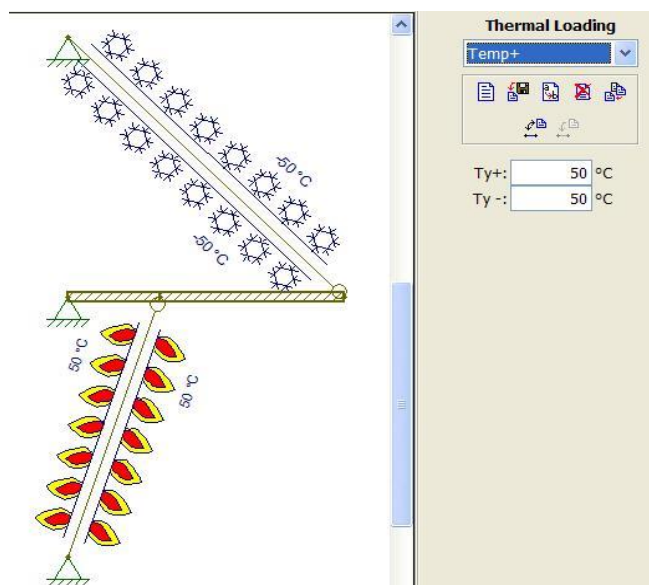


Рис. 2. Розрахункова схема стержневої конструкції в програмі Ftool з прикладеним температурним навантаженням

В програмі є декілька корисних опцій. При необхідності можна задати абсолютно жорсткий брус в конструкції, увімкнути або вимкнути на схемі напрямок орієнтації стержнів, показати їх розміри. У випадку прикладення температурного навантаження, воно відображається на стержнях у вигляді вогників або сніжинок. У програмі передбачена можливість встановлення різних одиниць вимірювання і степені точності результатів розрахунків.

**TwoDFrame** – це програмне забезпечення для лінійного пружного структурного аналізу і проектування двовимірних стержневих систем. У програмі можна провести статичний і динамічний аналіз конструкцій балки або колони із залізобетону, конструкційної сталі або конструкцій з будівельної деревини. TwoDFrame може легко використовуватися в багатомовних проектах або робочих середовищах. Вона навіть може служити основним засобом комунікації для інженерів з різних країн, які працюють над міжнародними проектами.

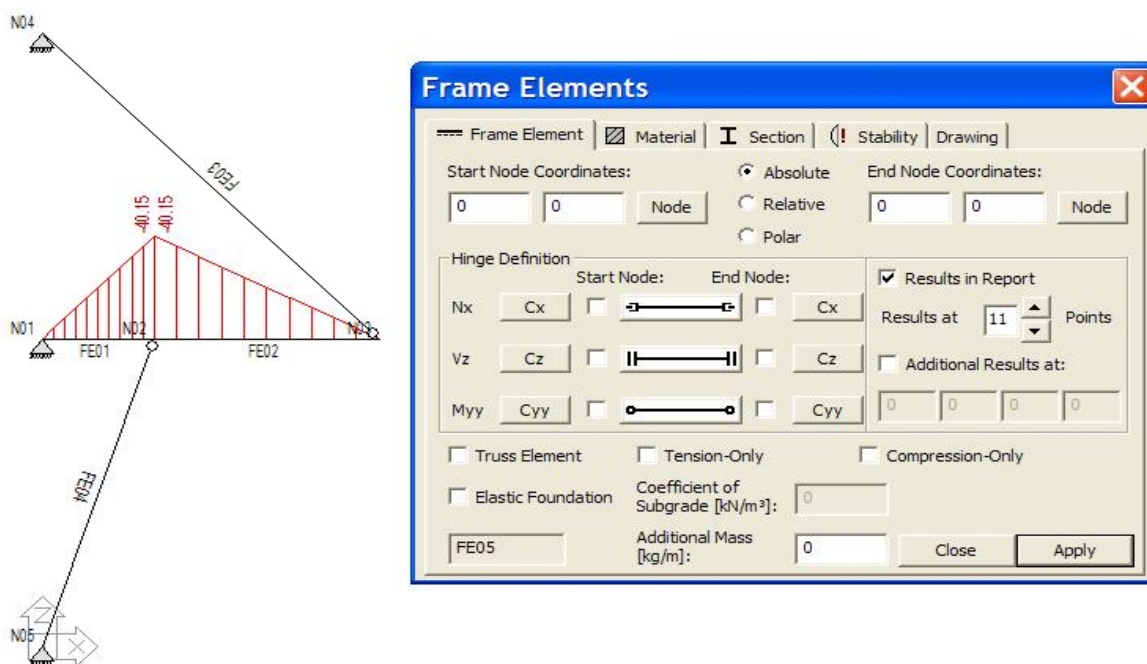


Рис. 3. Розрахункова схема стержневої конструкції в програмі TwoDFrame

TwoDFrame має потужний графічний інтерфейс, що не має собі рівних по простоті використання і продуктивності інтуїтивно зрозумілий для користувача. Створення і модифікація структурної моделі, проведення аналізу, а також перевірка і оптимізація проекту виконуються в одному інтерфейсі

Для більшості програм алгоритм підготовки розрахункової схеми майже однаковий і складається з наступних пунктів:

- визначитись з одиницями вимірювання розрахункових величин;
- задати координати вузлів за допомогою миші або табличним способом;
- визначити початок і кінець кожного із стержнів конструкції;
- задати матеріал (модуль пружності, коефіцієнт лінійного розширення) і геометричні характеристики перерізів стержнів (площу перерізу, осьовий момент інерції);
- задати закріплення вузлів конструкції;
- прикласти задане навантаження на вузли і стержні;
- виконати розрахунок.

**MAV.Structure** створена головним чином для розрахунку мостів. Програма дозволяє розраховувати просторові лінійні і геометрично нелінійні стержневі й нитково-стержневі системи. Важливою особливістю програми є те, що вона має вбудоване середовище програмування, яке дозволяє користувачу проводити автоматизацію виконання вимог нормативних документів при підготовці вихідних даних і інші обчислення.

Вихідні дані для розрахунку задаються на вхідній мові, завдяки вбудованим в нього елементів програмування можна автоматизувати підготовку вихідних даних, виконання вимог нормативних документів, обробку результатів аналізу конструкції, а також здійснювати допоміжні розрахунки, наприклад, економічні.

Програмний комплекс MAV.Structure призначений для чисельного дослідження напружено-деформованого стану, динаміки й стійкості стержневих конструкцій, як у лінійної, так і в геометрично й фізично нелінійній постановці. Його відмінною рисою є пристосованість для розрахунку мостових споруджень, можливість побудови й наступної обробки ліній і поверхонь впливу, а також наявність вбудованої мови програмування, призначеної для автоматизації складних розрахунків і допоміжних обчислень, що виконуються при підготовці вихідних даних.

Серед розглянутого програмного забезпечення тільки в MAV.Structure передбачена можливість розрахунку монтажних напружень, точніше зусиль, які виникають в стержнях статично невизначуваних конструкцій в тому випадку, коли стержні виготовлені довшими або коротшими за номінальний розмір. Методика розрахунку монтажних напружень розглянуто в [10]. Відхилення розміру стержня від номінального задається в масиві характеристик початкових станів стержневих елементів – заголовок масива Start ParaNa2n. В цьому масиві задається лінійна нев'язка довжини стержня (різниця між довжиною заготовки стержня і відстанню між вузлами в розрахунковій схемі), позитивна нев'язка довжини – якщо заготовка коротше елемента в початковому стані.

Температурне навантаження можна реалізувати в програмі MAV.Structure через лінійну нев'язку обчисливши її за формулою:

$$\Delta l = \alpha \cdot l \cdot \Delta t,$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт лінійного теплового розширення матеріалу стержня;

$l$  – довжина стержня;  $\Delta t$  – перепад температури.

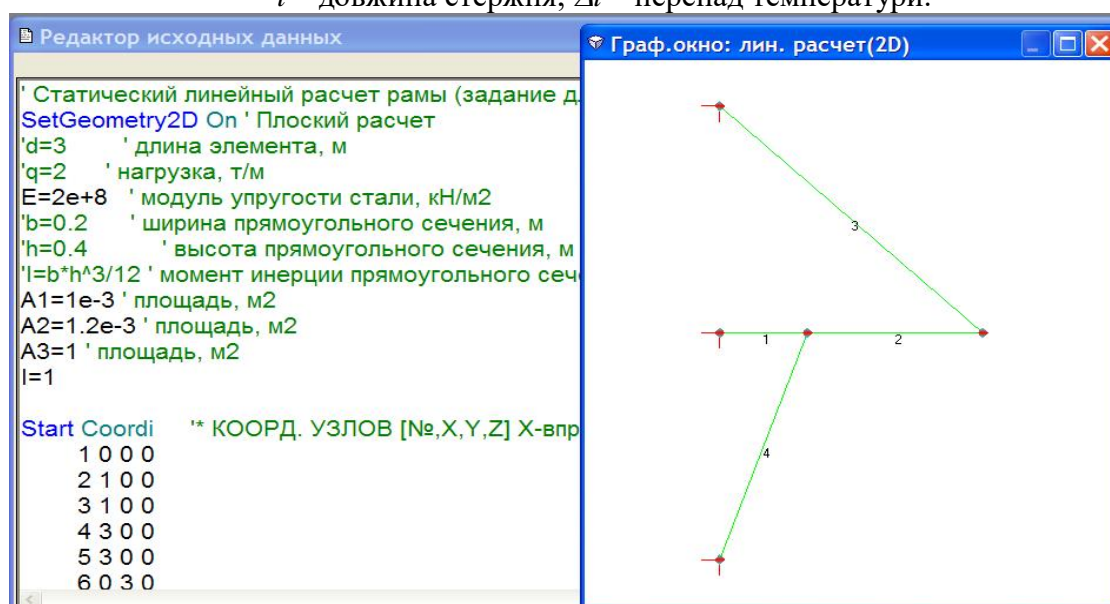


Рис. 4. Розрахункова схема стержневої конструкції в програмі MAV.Structure

Особливістю даної програми є те, що в ній не вказуються одиниці вимірювання розрахункових величин, тому користувач повинен сам визначати для себе, в яких одиницях вимірювання будуть вводитися величини, і враховувати це при аналізі результатів розрахунку. Це підвищує у студента навички роботи з різними одиницями вимірювання.

**Висновки, рекомендації, перспективи подальших досліджень.** Використання в освітньому процесі подібних некомерційних прикладних програмних систем забезпечує реалізацію навчально-пізнавальної, дослідницької, аналітичної діяльності, підвищує ефективність самостійної роботи студента, закріплює базові знання, підвищує пізнавальну активність і мотивацію засвоєння знань за рахунок різноманітності форм роботи, формує здатність до контрольної-оціночних дій за допомогою порівняльного аналізу результатів, отриманих різними способами.

Використання сучасних комп'ютерних технологій, зокрема розглянутого некомерційного програмного забезпечення, дає студенту знання і практичні навички роботи з програмами, які необхідні сучасному інженеру. Забезпечує можливість за рахунок зменшення витрат часу на рутинні математичні обчислення розв'язати більшу кількість задач, що сприяє кращому засвоєнню дисципліни і підвищенню якості професійної підготовки майбутніх фахівців.

Однак не варто забувати, що основною перевіркою будь-якого з результатів розрахунків був і залишається фізичний експеримент. Будь-який з розрахунків становить усього лише моделювання реальної конструкції і від того, наскільки вдала модель і математичний апарат, який реалізує цю модель, залежить відповідність (або невідповідність) результатам експериментальної перевірки.

Пропоноване програмне забезпечення допомагає досить швидко і ефективно розв'язувати різні задачі, але це має сенс тільки тоді, коли математична і загальнотехнічна підготовка студента дозволяє йому грамотно оцінити отриманий результат і зробити відповідні висновки.

Здійснене дослідження не вичерпує всіх аспектів проблеми. Подальшого дослідження потребують питання розробки навчальних планів, методик навчання та експериментальна перевірка системи застосування пропонованого програмного забезпечення для студентів різних спеціальностей.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. LinPro. Program for static and dynamic analysis of plane frames. Nov. 2015. URL: <http://siljak.ba/toysforchildren.html#download>
2. TwoDFrame. Structural Analysis and Design of Two-Dimensional Frames Copyright 2002-2019. URL: <http://www.ralfmartinhansen.de/>
3. Ftool. Interactive-Graphics Program for Structural Analysis. 2018. URL: [www.ftool.com.br](http://www.ftool.com.br)
4. MAV.Structure - расчет конструкций методом конечных элементов. 2000-2016. URL: <http://mav-structure.narod.ru/> (in Russian)
5. ЛИРА-САПР. Программа для проектирования и расчета строительных конструкций. LIRALAND Group. 2002 – 2020. URL: <https://www.liraland.ua/> (in Russian)
6. SCAD Office. Вычислительный комплекс для прочностного анализа конструкций методом конечных элементов. 2001-2020. URL: <https://scadsoft.com/> (in Russian)
7. Autodesk. Robot Structural Analysis Professional. (2020). URL: <https://www.autodesk.com/education/free-software/robot-structural-analysis>
8. RISA. Powerful Design and Analysis Solutions. 2020. URL: <https://risa.com/>

9. Девін В.В., Ткачук В.С. Застосування методу скінченних елементів для визначення температурних напружень в фермах. Збірник наукових праць Подільського державного аграрно-технічного університету. Серія: Технічні науки, вип. 20. Кам'янець-Подільський. 2012. с. 434-440.
10. Ткачук В.С., Девін В.В. Визначення монтажних напружень в шарнірно-стержневих системах з використанням методу скінченних елементів. Збірник наукових праць Подільського державного аграрно-технічного університету № 24. Кам'янець-Подільський, 2016. с. 251-261.

## USAGE OF NON-COMMERCIAL EDUCATIONAL SOFTWARE TO CALCULATE FRAME STRUCTURES

### Vladlen Devin

PhD (technical sciences), Associate Professor of the Department of General Technical Sciences  
State Agrarian and Engineering University in Podilya, Kamianets-Podilskyi, Ukraine  
*dvvkp.123@gmail.com*  
ORCID: 0000-0003-2994-3144

### Vasil Tkachuk

PhD (technical sciences), Associate Professor of the Department of General Technical Sciences  
State Agrarian and Engineering University in Podilya, Kamianets-Podilskyi, Ukraine  
*twska@i.ua*  
ORCID: 0000-0001-5414-2387

### Vasil Burdega

PhD (technical sciences), Associate Professor of the Department of General Technical Sciences  
State Agrarian and Engineering University in Podilya, Kamianets-Podilskyi, Ukraine  
*burdega\_vasil@ukr.net*

**Abstract.** Students of engineering universities and colleges studying the disciplines “Structural Mechanics”, “Strength of Materials”, “Mechanics of Materials and Structures” in practical classes and during independent work rely on the strength of various kinds of bar structures. As the experience of teaching these disciplines shows, students have particular difficulties in calculating precisely statically indeterminable trussed systems. This is due to the fact that, in order to reveal static indeterminacy, in addition to the equilibrium equations of statics, it is necessary to surrender additional strain compatibility equations. The article considers the problem of improving the quality of teaching technical and construction engineer students using information technology. Several non-commercial educational software solutions for the calculation of frame structures were reviewed and analyzed. There is a recommended methodology for using this software within the educational process by teachers and students of technical universities and colleges for calculating statically indeterminable trussed systems. The research problem is to identify opportunities for intensifying the learning process for engineers of technical and construction specialties through the usage of non-commercial educational software. The article provides reasons to use suggested programs while teaching such disciplines as “Structural Mechanics”, “Strength of Materials”, “Mechanics of Materials and Structures” by students of engineering universities and colleges. The software is used to support and supplement theoretical lectures, during practical seminars; it acts as an additional educational tool to strengthen knowledge gained by students. It is proved that software and computer training technologies have great educational and development potential, provide maximum activity of participants during educational process and optimize training time and its effectiveness.

**Keywords:** building mechanics; strength of materials; mechanics of materials and structures; information technology; non-commercial software



**REFERENCES (TRANSLATED AND TRANSLITERATED)**

1. LinPro. Program for static and dynamic analysis of plane frames. (2015). <http://siljak.ba/toysforchildren.html#download>
2. TwoDFrame. Structural Analysis and Design of Two-Dimensional Frames Copyright (2002-2019). <http://www.ralfmartenhansen.de/>
3. Ftool. Interactive-Graphics Program for Structural Analysis (2018). [www.ftool.com.br](http://www.ftool.com.br)
4. MAV.Structure - finite element analysis. (2000-2016). <http://mav-structure.narod.ru/> (in Russian)
5. LIRA-SAPR. Program for design and calculation of building structures. LIRALAND Group, (2002 – 2020). <https://www.liraland.ua/>(in Russian)
6. SCAD Office. Computing complex for strength analysis of structures by the finite element method. (2001-2020). <https://scadsoft.com/> (in Russian)
7. Autodesk. Robot Structural Analysis Professional. (2020). <https://www.autodesk.com/education/free-software/robot-structural-analysis>
8. RISA. Powerful Design and Analysis Solutions. (2020). <https://risa.com/>
9. Devin, V., & Tkachuk, V. (2012). Application of finite element method to determine temperature stresses in farms. Zbirnyk naukovykh prats Podilskoho derzhavnoho ahrarno-tekhnichnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky, tom. 20. Kamianets-Podilskyi, 434-440. (in Ukrainian)
10. Devin, V., & Tkachuk, V. (2016). Determination of mounting stresses in articulated rod systems using finite element method. Zbirnyk naukovykh prats Podilskoho derzhavnoho ahrarno-tekhnichnoho universytetu, №24. Kamianets-Podilskyi, 251-261. (in Ukrainian)