

შენება და კონსტრუირება

ღეროვანი სისტემების გაანგარიშების მეთოდის დამუშავება Mathcad - ის სისტემაში

ომარ კიკვიძე

მალხაზ დოგრაშვილი

malkhaz.dograshvili@atsu.edu.ge

აპაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი

ქუთაისი, საქართველო

ნამრომში განხილულია ღეროვანი კონსტრუქციების გაანგარიშების რიცხვითი მეთოდი. კვანძების წონასწორობის პირობების საფუძველზე მიღებულია განტოლებათა სისტემა თექვსმეტი უცნობისათვის. სისტემა ჩაწერილია უგანზომილებო სიდიდეებში, რომელიც ამოხსნილია რიცხობრივად გაუსის მეთოდით Mathcad - ის სისტემაში. დადგენილია ღეროებში აღძრული მაქსიმალური ძალის სიდიდე და შედარებულია ანალიზურ ამოხსნასთან. ნაჩვენებია რიცხვითი ამოხსნის უპირატესობა ანალიზურ მეთოდთან შედარებით.

საკვანძო სიტყვები: სამშენებლო კონსტრუქციები, ღეროვანი სისტემები, საანგარიშო მოდელი, მატრიცა, Mathcad- ის სისტემა, რიცხვითი ანგარიში.

ღეროვანი კონსტრუქციების სიმტკიცის, სიხისტის და მდგრადობის უზრუნველყოფისათვის ღეროების კვეთების შერჩევა ხორციელდება შედგენილი საანგარიშო მოდელის გამოყენებით. საანგარიშო მოდელების განვითარება უშუალოდაა დაკავშირებული მათემატიკური ანალიზის მეთოდების, დიფერენციალური და ინტეგრალური აღრიცხვის მეთოდების, რიცხვითი ანალიზის მეთოდების განვითარებასთან.

მე-17 საუკუნემდე კაცობრიობისათვის თითქმის არაფერი იყო ცნობილი გაანგარიშების რამდენადმე დასაბუთებულ მეთოდებზე. ჰუკის კანონმა საფუძველი მოგვცა წარმოგვედგინა კონსტრუქციის მუშაობა და შეგვესრულებინა შემდგომი გაანგარიშებები. მათი ანალიზის მეთოდებით შესაძლებელი გახდა მიღებული ყოფილიყო ძირითადი დიფერენციალური დამოკიდებულებები შიგა ძალებსა და გარე ძალების ინტენსივობას შორის, დაეკავშირებინა შიგა ძალოვანი ფაქტორები და გადაადგილებები (ხაზოვანი და კუთხური), გვეპოვა კვეთის ინერციის მომენტები, გაგვეანგარიშებინა ძაბვები და დეფორმაციები.

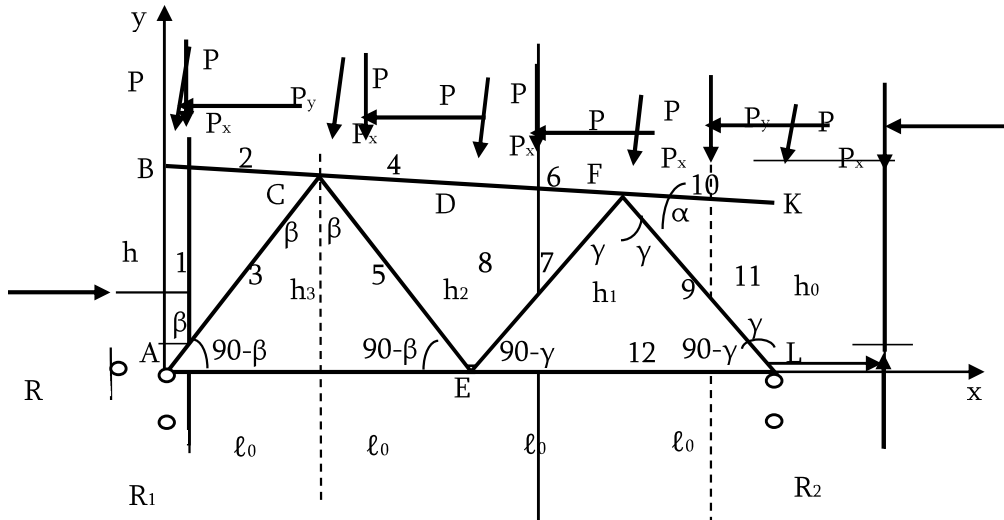
სივრცითი კონსტრუქციების და ნაგებობების პრაქტიკულმა მოთხოვნილებებმა სწრაფადგანვითარებად მანქანათმშენებლობაში, გემთმშენებლობაში, მშენებლობაში, ავიამშენებლობაში განაპირობა

სიმტკიცეზე და მდგრადობაზე გაანგარიშების მეთოდების სრულყოფა და განვითარება.

მეთოდოლოგიური თვალსაზრისით მნიშვნელოვანი იყო განსხვავების წარმოდგენა სტატიკურად რკვევად და სტატიკურად ურკვევ სისტემებს შორის და გაანგარიშების მეთოდების დამუშავება. ასეთებია: ძალთა მეთოდი, გადაადგილების მეთოდი, შერეული მეთოდი, რიცხვითი მეთოდების დამუშავება, სასრული ელემენტების მეთოდი. კონსტრუქციული თვალსაზრისით სტატიკურად ურკვევ სისტემაში ცალკეული ელემენტების მწყობრიდან გამოსვლა არ იწვევს კონსტრუქციის მწყობრიდან გამოსვლას კატასტროფულად (რღვევას) (Снитко 1972: 136). თუმცა ყოველი ელემენტი დაკავშირებულია დამატებით ხარჯებთან და თუ შესაძლებელია სტატიკურად რკვევადი და კინემატიკურად უცვლელი ღეროვანი სისტემით უზრუნველყოთ კონსტრუქციის სიმტკიცე და სიხისტე, არჩევანი მასზე უნდა გავაკეთოთ. ასეთი კონსტრუქციები მსუბუქია და სამონტაჟო სამუშაოების შესრულების თვალსაზრისით უფრო ტექნოლოგიური. სტატიკურად რკვევად მზიდ კონსტრუქციებში არ წარმოიქმნება დამატებითი ძაბვები დაკავშირებული საყრდენების დაჯდომასთან. უნდა აღვნიშნოთ, რომ მოცემულ შემთხვევაში არ განვიხილავთ მღუნავ მომენტს.

ფერმებში ღეროები კვანძებში შეერთებულია ან მოქლონურად, ან შედუღებით, ანუ ხისტად. როგორც გაანგარიშებები აჩვენებს, ლითონურ ფერმებზე კვანძებში მოქმედი ძალებისას, ფერმის ღეროებში აღძრული ძალები ხისტი შეერთებისას მცირედით განსხვავდება იმ ძალებისაგან, რომლებიც აღიმგრება ღეროებში სახსრულად შეერთებისას კვანძებში (ვალიშვილი 2008: 323; Александров 1983: 264), ამიტომ გაანგარიშებისას განვიხილავთ ფერმას, რომლის ყველა ელემენტი კვანძებში შეერთებულია სახსრულად (იდეალური სახსრებით) (ნახ.1).

შევადგინოთ საანგარიშო მოდელი ნახ.1-ზე ნაჩვენები ღეროვანი სისტემისათვის.



ნახ.1. ღეროვანი სისტემის საანგარიშო სქემა.

გარე აქტიური დატვირთვის P ვექტორი დავშალოთ P_x და P_y მდგენელებად X და Y ღერძების მიმართ (ნახ. 1).

$$P_y = P \cdot \cos \alpha; \quad P_x = P \cdot \sin \alpha \quad (1)$$

A და L საყრდენებში აღძრული რეაქციის ძალების (R, R_1, R_2) მნიშვნელობები განისაზღვრება წონასწორობის განტოლებებიდან. მივიღებთ:

$$R = 5P_x = 5P \cdot \sin \alpha. \quad (2)$$

$$R_2 = P[10 \cos \alpha l_o + \sin \alpha(h + h_3 + h_2 + h_1 + h_o)]/(4l_o) \quad (3)$$

$$R_1 = 5P \cdot \cos \alpha - R_2 \quad (4)$$

ღეროებში აღიძვრება ძალები მხოლოდ გრძივი მიმართულებით.

ფერმას აქვს მარცხენა საყრდენი უძრავი სახსრით და მარჯვენა მოძრავი სახსარი. დავადგინოთ სტატიკურად ურკვევობის ხარისხი ღეროვანი სისტემისათვის. ფორმულით $n=S-2K$. სადაც S - ღეროების რაოდენობაა საყრდენების ჩათვლით. $S = S_1 + m$, S_1 არის ფერმაში ღეროების რაოდენობა, m არის გარე საყრდენებში აღძრული რეაქციის ძალების რაოდენობა. $S=16$. $K=8$. შესაბამისად $n=16-16=0$ და ფერმა სტატიკურად რკვევადია.

ო. კიკვიძე, მ. დოგრაშვილი

$$\begin{aligned}
 N_{AB} &= X_1; \quad N_{BC} = X_2; \quad N_{AC} = X_3; \\
 N_{CD} &= X_4; \quad N_{CE} = X_5; \quad N_{DF} = X_6; \\
 N_{FE} &= X_7; \quad N_{DE} = X_8; \quad N_{FL} = X_9; \\
 N_{FK} &= X_{10}; \quad N_{KE} = X_{11}; \quad N_{LE} = X_{12}; \\
 N_{AE} &= X_{13}; \quad R_1 = X_{14}; \quad R = X_{15}; \quad R_2 = X_{16};
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

კვანძებში აღძრული და საყრდენების რექაციის ძალების განმსაზღვრელი განტოლებები ჩავწერთ შემოდებული აღნიშვნებით:

$$\begin{aligned}
 \cos \alpha X_2 &= P \sin \alpha; \quad X_1 + \sin \alpha X_2 = -P \cos \alpha; \quad X_{10} \cos \alpha = -P \sin \alpha \\
 X_{11} - X_{10} \sin \alpha &= -P \cos \alpha \\
 X_2 \cos \alpha - X_4 \cos \alpha + X_3 \sin \beta - X_5 \sin \beta &= -P \sin \alpha \\
 X_5 \cos \beta + X_3 \cos \beta + X_4 \sin \alpha - X_2 \sin \alpha &= -P \cos \alpha \\
 -X_4 \cos \alpha + X_6 \cos \alpha &= P \sin \alpha; \quad X_8 - X_4 \sin \alpha + X_6 \sin \alpha = -P \cos \alpha \\
 X_9 \sin \gamma + X_{12} &= 0; \quad X_9 \cos \gamma + X_{11} + X_{16} = 0 \\
 X_{10} \cos \alpha - X_6 \cos \alpha + X_9 \sin \gamma - X_7 \sin \gamma &= P \sin \alpha \\
 X_{10} \sin \alpha - X_6 \sin \alpha + X_9 \cos \gamma + X_7 \cos \gamma &= -P \cos \alpha \\
 X_8 + X_7 \cos \gamma + X_5 \cos \beta &= 0; \quad X_7 \sin \gamma + X_{12} - X_5 \sin \beta - X_{13} = 0 \\
 X_1 + X_3 \cos \beta + X_{14} &= 0; \quad X_{13} + X_3 \sin \beta + X_{15} = 0
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

(11) წრფივ განტოლებათა სისტემა აღწერს რვა კვანძიანი ფერმის სტატიკას ღეროებში აღძრული ნორმალური ძალების განსაზღვრისათვის. განტოლებათა სისტემის ამოხსნა საკმაოდ შრომატევადია და მოსახერხებელია რიცხვითი მეთოდის გამოყენება.

თუ (11) განტოლებათა სისტემას ჩავწერთ (8) ფორმით, მაშინ (9) ფორმულაში აღნიშვნების შესაბამისად გვაქვს:

$$X = \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \\ X_6 \\ X_7 \\ X_8 \\ X_9 \\ X_{10} \\ X_{11} \\ X_{12} \\ X_{13} \\ X_{14} \\ X_{15} \\ X_{16} \end{Bmatrix}, \quad B = \begin{Bmatrix} P \sin \alpha \\ -P \cos \alpha \\ -P \sin \alpha \\ -P \cos \alpha \\ -P \sin \alpha \\ -P \cos \alpha \\ P \sin \alpha \\ -P \cos \alpha \\ 0 \\ 0 \\ P \sin \alpha \\ -P \cos \alpha \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & \cos \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & \sin \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\sin \alpha & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \beta & -\cos \alpha & -\sin \beta & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \beta & \sin \alpha & \cos \beta & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\cos \alpha & 0 & \cos \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin \alpha & 0 & \sin \alpha & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sin \gamma & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \gamma & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\cos \alpha & -\sin \gamma & 0 & \sin \gamma & \cos \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\sin \alpha & \cos \gamma & 0 & \cos \gamma & \sin \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \beta & 0 & \cos \gamma & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\sin \beta & 0 & \sin \gamma & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \cos \beta & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sin \beta & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

რიცხვითი გაანგარიშებისათვის შემოვიღოთ უგანზომილებო სიდიდეები შემდეგი სახით: $\bar{X}_i = X_i / P \quad i = 1, 2, \dots$, A მატრიცა არ შეიცვლება, ხოლო X და B ვექტორები ჩაიწერება ასე:

$$\bar{X} = \begin{pmatrix} \bar{X}_1 \\ \bar{X}_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \\ X_6 \\ X_7 \\ X_8 \\ X_9 \\ X_{10} \\ X_{11} \\ X_{12} \\ X_{13} \\ X_{14} \\ X_{15} \\ X_{16} \end{pmatrix} \quad \bar{B} = \begin{pmatrix} \sin \alpha \\ -\cos \alpha \\ -\sin \alpha \\ -\cos \alpha \\ -\sin \alpha \\ -\cos \alpha \\ \sin \alpha \\ -\cos \alpha \\ 0 \\ 0 \\ \sin \alpha \\ -\cos \alpha \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

(14) მატრიცების გათვალისწინებით (8) განტოლებათა სისტემა უგანზომილებო სიდიდეებში ჩაიწერება შემდეგი სახით:

$$A \bar{X} = \bar{B} \quad (15)$$

(9) წრფივ თექვსმეტუცნობიანი განტოლებათა სისტემის ანალიზური ამოხსნა საკმაოდ შრომატევადია. ფერმის გეომეტრიის ყოველი ცვლილებისათვის საჭიროა განტოლებათა სისტემის ამოხსნა და კვეთის ანგარიში.

წრფივ ალგებრულ განტოლებათა სისტემა ეფექტურად ამოიხსნება რიცხობრივად გაუსის მეთოდით. მით უფრო წრფივ განტოლებათა სისტემის ამოხსნის სტანდარტული პროგრამები, ჩაშენებული ფუნქციები არის პერსონალური კომპიუტერებისათვის თავსებად ყველა სისტემაში. ჩვენ ავირჩიეთ Mathcad - ის სისტემა.

როგორც ცნობილია, წრფივ განტოლებათა სისტემას აქვს ერთადერთი ამონახსენი, თუ A მატრიცა არის არაგადაგვარებული (არასინგულარული), ანუ მისი დეტერმინანტი არ არის ნულის ტოლი.

A მატრიცა არის კვადრატული მარტიცა (16×16). წრფივ განტოლებათა სისტემის ამოხსნა კვადრატული მატრიცით მათემატიკური თვალსაზრისით არ წარმოადგენს სირთულეს თუ ის არ არის ძალიან დიდი. (8) მატრიცული სახით ჩაწერილი განტოლებები (13) და (14)

მატრიცების გათვალისწინებით, Mathcad - ის სისტემაში ამოიხსნება ჩაშენებული ფუნქციით *ISOLVE* (*A, B*) (Кирьянов 2006: 217):

A - სისტემის კოეფიციენტების მატრიცაა (13) მატრიცა.

B - მარჯვენა მხარეების ვექტორია, მეორე მატრიცა (14).

რიცხვითი გაანგარიშება შესრულებული იქნა ფერმის გეომეტრიის შემდეგი მონაცემებისათვის:

$$h = 2500 \text{ მმ} \quad h_0 = 1841 \text{ მმ} \quad l_0 = 1755 \text{ მმ.}$$

$$AL = 4 l_0 \quad LF = 2665 \text{ მმ} \quad AC = 2921 \text{ მმ.}$$

$$\alpha = \arctg[(h - h_0)/|AL|]; \quad \gamma = \arcsin[l_0/|LF|] \quad \beta = \arcsin[l_0/|AC|]$$

საჭიროა, ასევე, შეტანილ იქნას A და B მატრიცები. ცხრილში 1.

მოცემულია რიცხვითი გაანგარიშების შედეგები $\bar{X}_1, \bar{X}_2, \bar{X}_3, \dots, \bar{X}_{16}$ უცნობებისათვის. ცხრილში ბოლო სამი რიცხვი შეესაბამება რეაქციის ძალების მნიშვნელობებს.

მაქსიმალური განსხვავება რიცხვით გაანგარიშებასა და ანალიზურ ამონახსნს შორის ნაკლებია 3%-ზე. რიცხვითი გაანგარიშების

შედეგების მიხედვით: $\left| \bar{X}_{i \max} \right| = \left| \bar{X}_3 \right| = 2,038$

(11) განტოლებათა სისტემის ანალიზური ამოხსნით მაქსიმალური ძალის უგანზომილებო სიდიდე $\left| X_{i \max} \right|$ მიღებული იქნა 1,98 - ის ტოლი.

ცხრილი 1.

	0
0	-1.004
1	0.094
2	-2.038
3	-1.643
4	0.996
5	-1.549
6	0.277
Isolve(A, b) = 7	-1.004
8	-1.781
9	-0.094
10	-1.004
11	1.173
12	0.757
13	2.634
14	0.467
15	2.345

Mathcad-ის სისტემაში შედგენილი პროგრამა მნიშვნელოვნად ამცირებს გაანგარიშების მოცულობას და საშუალებას იძლევა ავტომატიზირებულ რეჟიმში შევასრულოთ რიცხვითი ექსპერიმენტები.

ლიტერატურა

- ვალიშვილი, დ. გიორგელიძე. 2008. *მასალების და კონსტრუქციების გამძლეობა*. თბილისი: „ჯისიაი“.
- Александров А.В., Лащенко Б.Я., Шапошников Н.Н. 1983. *Строительная механика. Тонкостенные пространственные системы*. Под ред. А.Ф. Смирнова. Н.: Стройиздат.
- Кирьянов Д.В. 2006. *Самоучитель Mathcad 13*. СПб. : БХВ – Петербург.
- Снитко Н.К. 1972. *Строительная механика*. М.: Высшая школа.

Building and Construction

Developing the Method of Structural Design of the Bar Systems using the Mathcad Software

Omar Kikvidze

Malkhaz Dograshvili

malkhaz.dograshvili@atsu.edu.ge

Akaki Tsereeli State University

Kutaisi, Georgia

The article considers the numerical method of structural design of the bar systems. Based on the equilibrium conditions of nodes, a system of equations for sixteen unknowns was obtained. The system is written in dimensionless quantities, which can be solved numerically by the Gaussian method in the Mathcad system. The magnitude of the maximum force arising in the bars is determined and compared with the analytical solution. The advantages of numerical solution over the analytical method are shown.

Keywords: building structures; bars systems; computational model; matrix; Mathcad package; numerical calculation.

To ensure the strength, rigidity and durability of the bar structures, the selection of the bar sections is made using the design model developed. Until the 17th century, almost nothing was known to mankind about any well-founded

methods of calculation. Hooke's law allowed us to present the behavior of the structure and perform further calculations. Through their analysis, it was possible to obtain the basic differential relationships between internal forces and the intensity of external forces, to connect internal force factors and displacements (linear and angular), to find the moments of intersection inertia, to calculate stresses and strains.

The practical needs of the spatial structures and buildings in the fast-paced mechanical engineering, shipbuilding, building sector and aircraft construction have led to the improvement and development of methods strength and durability calculation.

From a methodological point of view, it was important to distinguish between statically determinate and statically indeterminate systems and to develop the methods of calculation. These are: the force method, displacement method, mixed method, development of numerical methods, finite element method. The failure of individual elements in a statically indeterminate system from a structural point of view does not lead to the failure of the structure. (Snitko 1972: 136) If it is possible to ensure the strength and rigidity of the structure with a statically determinate and kinematically unchanged bar system, the choice should be fallen on it. Such structures are lighter and more technological in terms of installation work. In the statically rigid load-bearing structures, no additional stresses are generated associated with the settling of supports.

In trusses, the bars are joined at the nodes either by riveting or by welding. As the calculations show, under the action of forces arising in the nodes on metal trusses at the rigid junction are slightly different from forces arising in the bars at the articulated connection in the nodes. Therefore, in the calculation, we consider the truss, all the elements of which are hingedly connected in the nodes (Valishvili 2008: 323; Aleksandrov 1983: 264).

Let us decompose the vector P of the external active load into the P_x and P_y

Let us decompose the vector P of the external active load into the P_x and P_y components with respect to the X and Y axes (Fig. 1).

$$P_y = P \cdot \cos \alpha; \quad P_x = P \cdot \sin \alpha \quad (1)$$

The values of the reaction forces (R, R_1, R_2) induced in supports A and L are determined from the equilibrium equations. We shall obtain:

$$R = 5P_x = 5P \cdot \sin \alpha. \quad (2)$$

$$R_2 = P[10 \cos \alpha l_o + \sin \alpha(h + h_3 + h_2 + h_1 + h_o)]/(4l_o) \quad (3)$$

$$R_1 = 5P \cdot \cos \alpha - R_2 \quad (4)$$

Let us determine the degree of redundancy of the bar system. With the formula $n=S-2K$, where S is the number of bars including supports. $S = S_1 + m$, S_1 is the number of bars in the truss, m is the number of the reaction forces induced in the external supports. $S = 16$. $K = 8$. Respectively $n=16-16=0$, and the truss is statically determinate.

Let us use the method of joint isolation to determine the internal forces in the bars.

The equilibrium equations that contain unknowns $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$ imply account external forces are shown in Figures 5, 6, 7, and 8 and systems.

The system of equations can be represented in a vector-matrix form:

$$AX = B,$$

where

$$X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{pmatrix} \quad A = \begin{pmatrix} a_{11}a_{12} \dots a_{1n} \\ a_{21}a_{22} \dots a_{2n} \\ \dots \\ a_{n1}a_{n2} \dots a_{nn} \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} y_{1p} \\ y_{2p} \\ \dots \\ y_{np} \end{pmatrix} \quad (9)$$

The solution of the system of equations can be presented as follows:

$$X = A^{-1}B$$

Let us write the equations for the forces arising in the nodes and determining the reaction forces of supports using the introduced designations:

The system of linear equations describes the statics of the eight-node truss to determine the normal forces induced in the bars. Solving the system of equations is quite time consuming and convenient to use the numerical method.

Analytical solution of the system of linear equations with sixteen unknowns is quite time consuming. For each change in the geometry of truss, it is necessary to solve the system of equations and design the section.

The system of linear algebraic equations can be efficiently solved by the Gaussian method. The more standard programs for solving the system of linear equations, the more built-in functions are in all systems compatible with personal computers. We have chosen the Mathcad system.

As is well known, the system of linear equations has only one solution if the matrix A is non-singular that is, its determinant is not equal to zero.

The matrix A is a square matrix (16X16). Solving the system of linear equations with a square matrix is not mathematically difficult if it is not very large. The matrix equations are solved using the Mathcad package with a built-in function *ISOLVE* (A, B) (Kirianov 2006: 217).

Numerical calculation was performed for the following data of truss geometry:

$$\begin{aligned} h &= 2500 \text{ mm} & h_0 &= 1841 \text{ mm} & l_0 &= 1755 \text{ mm} \\ AL &= 4 l_0 & LF &= 2665 \text{ mm} & AC &= 2921 \text{ mm} \\ \alpha &= \arctg[(h - h_0)/|AL|]; \\ \gamma &= \arcsin[l_0/|LF|] & \beta &= \arcsin[l_0/|AC|] \end{aligned}$$

The matrices A and B also need to be included. Table 1. presents the results of the numerical calculation for unknowns $\bar{X}_1, \bar{X}_2, \bar{X}_3 \dots \bar{X}_{16}$. The maximum difference between the numerical and the analytical solutions is below 3%.

$$\text{According to the results of numerical calculation: } \left| \bar{X}_{i \max} \right| = \left| \bar{X}_3 \right| = 2,038$$

By analytical solution of the system of equations (11), the dimensionless value $|X_{i \max}|$ of the maximum force was obtained was equal to 1.98.

The program developed in the Mathcad system significantly reduces the computational volume and allows us to perform numerical experiments in an automated mode.