

ANALYZING AND IDENTIFYING THE LATENT FACTORS OF DIGITAL TRANSFORMATION IN EU COUNTRIES USING DATA SCIENCE METHODS

©2026 SHABELNYK T. V., PROKOPOVYCH S. V., GVOZDYTSKYI V. S., TESLENKO D. A.

UDC 330.3:330.4
JEL: M10; M15; O32; O33

Shabelnyk T. V., Prokopovych S. V., Gvozdytskyi V. S., Teslenko D. A. Analyzing and Identifying the Latent Factors of Digital Transformation in EU Countries Using Data Science Methods

Modern conditions of economic functioning require all subjects of economic, social, and political activity to implement digital solutions. In many countries, digitalization has been set as a strategic medium-term goal, as it becomes a key factor in increasing the competitiveness of countries in almost all areas. It has been proved that digitalization contributes to innovative growth, more efficient resource management, and the formation of new forms of interaction both among citizens and between business and the State, among others. Therefore, it is very important to develop and implement a systematic set of models based on modern methods of economic-mathematical modeling and machine learning, which will ensure sustainable economic growth and reduce the risks of socio-economic imbalances. The work substantiates that such Data Science methods as principal component analysis, correlation and cluster analysis, etc., make it possible to systematically study the multidimensional structure of digital transformation, identify latent factors of digital development, and determine the trajectories of countries' movement in the digital space. The combination of factor analysis with the dynamic study of the cluster structure allows for a deeper understanding of the mechanisms of digital evolution of EU countries and for assessing the efficiency of digital policy at the level of the European Union and individual countries. A structured system of digital development indicators relevant for analyzing EU countries has been formed. A correlation analysis of the specified indicators was also carried out, highlighting the structural relationships between them. Based on the principal component method, latent generalized factors of digital transformation were identified, integrating numerous digital indicators into several key areas of development. This allows for reducing the dimensionality of data and identifying the main driving forces of digitalization. The research results confirmed that today digitalization serves as the basis for increasing competitiveness, productivity, and innovation activity of the economy. It was substantiated that digital transformation is a complex multidimensional process that requires systemic analysis and the use of modern Data Science and machine learning methods, which will make it possible to assess the effectiveness of State policy, conduct comparative analysis of countries, and develop recommendations to accelerate digital progress.

Keywords: multidimensional analysis; digitalization; latent factors; principal component method; digital transformations.

Fig.: 10. **Tabl.:** 1. **Bibl.:** 12.

Shabelnyk Tetiana V. – D. Sc. (Economics), Professor, Head of the Department of Economic Cybernetics and System Analysis, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics (9a Nauky Ave., Kharkiv, 61166, Ukraine)

E-mail: tanya.shabelnik17@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9798-391X>

Researcher ID: <https://www.webofscience.com/wos/author/record/B-8542-2019>

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57220211152>

Prokopovych Svitlana V. – PhD (Economics), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Economic Informatics and Cybernetics, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics (9a Nauky Ave., Kharkiv, 61166, Ukraine)

E-mail: prokopovichsv@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6333-2139>

Gvozdytskyi Vitalii S. – PhD (Economics), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Economic Cybernetics and System Analysis, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics (9a Nauky Ave., Kharkiv, 61166, Ukraine)

E-mail: gvozdikramm@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4686-267X>

Teslenko Danylo A. – Analyst, LLC «IT SMARTFLEX» (49/2 Beresteyskyi Ave., Kyiv, 03057, Ukraine)

E-mail: teslenko09daniil@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4269-7282>

УДК 330.3:330.4
JEL: M10; M15; O32; O33

Шабельник Т. В., Прокопович С. В., Гвоздицький В. С., Тесленко Д. А. Аналіз та ідентифікація латентних факторів цифрової трансформації в країнах ЄС за допомогою методів Data Science

Сучасні умови функціонування економіки вимагають від усіх суб'єктів економічної, соціальної, політичної діяльності впровадження цифрових рішень. Багатьма країнами діджиталізація поставлена як стратегічна середньострокова мета, адже вона стає ключовим чинником підвищення конкурентоспроможності держав майже в усіх сферах. Доведено сприяння діджиталізації інноваційному зростанню, ефективнішому управлінню ресурсами та формуванню нових форм взаємодії як між громадянами, так і між бізнесом і державою тощо. Тому дуже важливо розробити та впровадити системний комплекс моделей, що базуються на сучасних методах економіко-математичного моделювання та машинного навчання, який забезпечуватиме стале зростання економіки та буде знижувати ризики соціально-економічних дисбалансів. У роботі обґрунтовано, що такі методи Data Science, як метод головних компонент, кореляційний і кластерний аналіз тощо надають змогу системно дослідити багатовимірну структуру цифрової трансформації, виокремити латентні фактори цифрового розвитку та визначити траєкторії руху країн у цифровому просторі. Поєднання факторного аналізу з динамічним вивченням кластерної структури дозволяє глибше зрозуміти механізми цифрової еволюції країн ЄС і оцінити ефективність цифрової політики на рівні Євросоюзу та окремих держав. Було сформовано структуровану систему

показників цифрового розвитку, релевантних для аналізу країн ЄС. Також проведено кореляційний аналіз зазначених індикаторів, виділено структурні зв'язки між ними. На основі методу головних компонент виділено латентні узагальнені фактори цифрової трансформації, які інтегрують численні цифрові показники в кілька ключових напрямів розвитку. Це дозволяє скоротити розмірність даних і виокремити основні рушійні сили цифровізації. Результати дослідження підтвердили, що сьогоденні цифровізація виступає основою підвищення конкурентоспроможності, продуктивності та інноваційної активності економіки. Було обґрунтовано, що цифрова трансформація є складним багатовимірним процесом, який потребує системного аналізу та застосування сучасних методів Data Science й машинного навчання, що надасть змогу оцінювати ефективність державної політики, порівняльного аналізу країн і формування рекомендацій щодо прискорення цифрового прогресу.

Ключові слова: багатовимірний аналіз; диджиталізація; латентні фактори; метод головних компонент; цифрові трансформації.

Рис.: 10. **Табл.:** 1. **Бібл.:** 12.

Шабельник Тетяна Володимирівна – доктор економічних наук, професор, завідувачка кафедри економічної кібернетики і системного аналізу, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця (просп. Науки, 9а, Харків, 61166, Україна)

E-mail: tanya.shabelnik17@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9798-391X>

Researcher ID: <https://www.webofscience.com/wos/author/record/B-8542-2019>

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57220211152>

Прокопович Світлана Валеріївна – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри економічної інформатики та кібернетики, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця (просп. Науки, 9а, Харків, 61166, Україна)

E-mail: prokopovichsv@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6333-2139>

Гвоздицький Віталій Сергійович – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри економічної кібернетики і системного аналізу, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця (просп. Науки, 9а, Харків, 61166, Україна)

E-mail: gvzdikramm@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4686-267X>

Тесленко Данііл Андрійович – аналітик, ТОВ «IT SMARTFLEX» (просп. Берестейський, 49/2, Київ, 03057, Україна)

E-mail: teslenko09daniil@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4269-7282>

Digitalization is becoming a key factor in increasing the competitiveness of countries, contributing to innovative growth, more effective resource management and the formation of new forms of interaction between citizens, business and the State. For the countries of the European Union, digital transformation is becoming strategic (according to the Digital Decade Policy Programme [1, 6]), as it determines the EU's ability to maintain global leadership in technological competition, ensure economic sustainability and mitigate the challenges of socioeconomic imbalances.

Modern methods of economic and mathematical modeling and machine learning, in particular the principal component method, correlation and cluster analysis, provide the opportunity to systematically study the multidimensional structure of digital transformation, identify latent factors of digital development and determine the trajectories of countries in the digital space. The combination of factor analysis with the dynamic study of the cluster structure allows for a deeper understanding of the mechanisms of digital evolution of EU countries and assess the effectiveness of digital policy at the level of the Union and individual Member States.

Thus, the relevance of the research topic is due to the strategic importance of digital transformation for the economic development of the EU, the need to identify structural and dynamic patterns of digitalization.

Analysis of scientific research and publications. The issue of digitalization is acute and relevant today, so a lot of research by both domestic and foreign scientists is devoted to the problem of determining the factors affecting digital transformations in different countries. In particular, Bocean C. G. and Vârzaaru A. A. in their work "EU countries' digital transformation, economic performance and sustainability" [2] conducted an empirical study of the impact of digital transformation on economic indicators and sustainability in EU countries, identified approaches to measuring digitalization and its connection with macro indicators. Many scientists pay attention to the relationship between digitalization and socioeconomic development indices, for example, Stavtyskyy A., Kharlamova G., Stoica E. A. in their work [9] studied the relationship between the digital economy and the social index in the EU. And Duarte M. et al. in their work [7] analyze how the levels of national digital transformation affect the configuration of innovation resources of EU countries, which lead to innovative results. Also the statistical analysis of the relationship between digitalization and innovation at the country level is devoted to the works of De Rojas F. H., et al. [5].

However, among the scientific works there are few that analyze and isolate the factors that directly affect the digital transformation in the country. Therefore, research aimed at identifying key

and latent factors of digital transformation is important both from a theoretical and practical point of view.

Aim of the work. The aim of this work is to analyze the processes of digital transformation in the countries of the European Union and identify key and hidden factors influencing digitalization using methods of multidimensional analysis and economic and mathematical modeling.

Results. The digital transformation of countries is a multidimensional process that covers various aspects of socioeconomic development, including the use of information and communication technologies (ICT) by the population, the digitalization of the business sector, the level of digital skills and the development of the ICT industry, etc. [3]. The high complexity of this phenomenon necessitates the use of a system approach to its analysis.

Among the indicators used by the European Commission to assess the level of digital maturity of individual countries, identify gaps between regions and monitor progress towards the strategic goals of Digital Europe and which are published in Eurostat [8; 10; 11], taking into account multicollinearity, the following were selected for this study (*Tbl. 1*).

The proposed system of indicators well covers two key dimensions of digital transformation: digital inclusion, i.e. access to digital services and the Internet, as well as digital skills. The indicators of the third and fourth groups reflect the digital economy from the point of view of e-commerce and the level of development of the ICT sector [12].

The second stage of the study involves a preliminary analysis of the source data, filling in the gaps in the source data, studying the relationships between individual indicators based on correlation analysis methods, including checking the presence of autocorrelation between indicators.

The time frame of this study is limited to the period from 2013 to 2024, divided separately into 4 periods: 2013, 2016, 2020, 2024.

To study the relationship between indicators, a matrix of paired correlation coefficients was constructed in the next step. A fragment of the correlation matrix is shown in *Fig. 1*.

As can be seen from *Fig. 1*, there is a high correlation between the following indicators:

LIA – IUI (0.95). These indicators reflect access to the Internet and the use of the Internet by people.

IUI – IUB (0.93). Internet banking is part of the overall use of the Internet.

LIA – IUB (0.89). It is logical that Internet banking is possible where there is Internet.

% GVA – % PTE (0.84). These two indicators are two facets of the digital economy, but have slightly different meanings.

You can also notice the presence of a very close autocorrelation between these same indicators. But the more distant the periods, the lower the autocorrelation indicator.

It was decided not to exclude any of the indicators in order to preserve the reflection of different aspects of digitalization: access to the Internet, use of

Table 1

Indicators characterizing digital transformation processes in EU countries

No.	Marking	Definition
Group 1. Digital inclusion of the population		
1	LIA	Internet access rate (households), %
2	IUI	Internet use by individuals (last 3 months), %
3	IUB	Percentage of individuals using the Internet for online banking, %
4	IUSN	Percentage of individuals using the Internet for social networking, %
5	IUHI	Percentage of individuals using the Internet for health-related information, %
Group 2. Digital skills (competences)		
6	IUOC	Percentage of people who used the Internet to take an online course, %
Group 3. Business digitalization		
7	EnOO	Percentage of businesses that received orders online (at least 1%), %
8	ETE	Percentage of businesses' turnover in e-commerce, %.
Group 4. Digital Economy (ICT economy)		
9	% GVA	Percentage of ICT sector in gross value added, %
10	% PTE	Percentage of ICT sector personnel in total employment, %

	LIA_13	IUI_13	IUB_13	IUSN_13	IUHI_13	IUOC_13	EnOO_13	ETE_13	%GVA_13	%PTE_13
LIA_13	1									
IUI_13	0,946582	1								
IUB_13	0,893443	0,928198	1							
IUSN_13	0,632669	0,717626	0,696654	1						
IUHI_13	0,829638	0,8822	0,748973	0,614761	1					
IUOC_13	0,412346	0,484024	0,550547	0,380034	0,532995	1				
EnOO_13	0,537403	0,599651	0,516154	0,368519	0,508256	0,253981	1			
ETE_13	0,524093	0,498069	0,414986	0,276224	0,368969	0,109437	0,686079	1		
%GVA_13	0,451812	0,383914	0,328026	0,494552	0,244266	0,016722	0,357327	0,653318	1	
%PTE_13	0,741564	0,705854	0,704214	0,741264	0,556603	0,314926	0,465016	0,616509	0,840814	1
LIA_16	0,973531	0,918573	0,857539	0,59876	0,805319	0,427552	0,543242	0,535256	0,418841	0,700153
IUI_16	0,938976	0,981168	0,918587	0,708966	0,853332	0,48773	0,581815	0,508996	0,350359	0,695061
IUB_16	0,880718	0,929236	0,990002	0,699095	0,738966	0,554712	0,554989	0,447878	0,315419	0,686649
IUSN_16	0,561536	0,633648	0,609042	0,903894	0,484141	0,308451	0,421919	0,310758	0,479018	0,694615
IUHI_16	0,770174	0,814169	0,729651	0,647771	0,850817	0,479253	0,485334	0,276408	0,17484	0,512907
IUOC_16	0,562789	0,640606	0,697149	0,497606	0,574935	0,847107	0,291207	0,194176	0,042847	0,366517
EnOO_16	0,504447	0,540253	0,504777	0,316222	0,452388	0,2002	0,876763	0,731355	0,45446	0,516308
ETE_16	0,532556	0,533997	0,480625	0,27363	0,38394	0,157053	0,765099	0,958567	0,578923	0,60168
%GVA_16	0,380595	0,314321	0,296516	0,444606	0,168323	0,046274	0,295257	0,58458	0,978618	0,792444
%PTE_16	0,655525	0,604975	0,634347	0,708313	0,433917	0,234535	0,37874	0,552444	0,881993	0,955759

Fig. 1. A fragment of the correlation matrix

digital services, online activity, economic dimension and others.

At the next stage of the study, the principal component analysis (PCA) method was used, which will allow reducing the dimensionality of the space of indicators, identifying the latent factors of digitalization that are key, and identifying structural relationships between indicators.

PCA is one of the most common tools of multivariate analysis, which allows reducing the dimensionality of the feature space and identifying the most important latent (hidden) factors that explain the variation of the initial indicators. In the context of the digital transformation of EU countries, the use of PCA makes it possible to identify structural patterns in the digital behavior of the population, enterprises, and the ICT sector, as well as to identify generalized factors that underlie digital development [4].

The model for assessing digitalization factors was implemented for each of the four periods separately. For the period 1 (2013), the principal component method identified 2 latent factors (Fig. 2).

As can be seen from Fig. 2, the two selected factors for the 2013 data explain quite well the changes in the digital transformation indicators for EU countries. The first factor explains almost 61% of the changes, while the second factor – 15.14%. Together, the percentage of explained variance for the two indicators is more than 76%. This is a fairly good result.

The feasibility of isolating exactly two latent factors is also confirmed by the structure graph (changes in the values of the eigenvalues) (Fig. 3). It is advisable to choose such a number of principal components that are on a "steep" rather than a "gentle" descent. Fig. 3 shows a steep decline only until the second eigenvalue is extracted.

Fig. 4 shows the factor loadings after orthogonal rotation (Varimax normalized).

Factor loadings are correlations between each variable (digitalization indicator) and a hidden (latent) factor. They show how strongly each variable "belongs" to a factor. Varimax orthogonal rotation maximally cleans the structure of factors, simplifies interpretation, and eliminates correlations between factors. In this study, the loading vector after ro-

Eigenvalues (Digitalisation Dataset)				
Extraction: Principal components				
Value	Eigenvalue	% Total variance	Cumulative Eigenvalue	Cumulative %
1	6,090446	60,90446	6,090446	60,90446
2	1,514422	15,14422	7,604868	76,04868

Fig. 2. Eigenvalues and percentage of explained variance (2013)

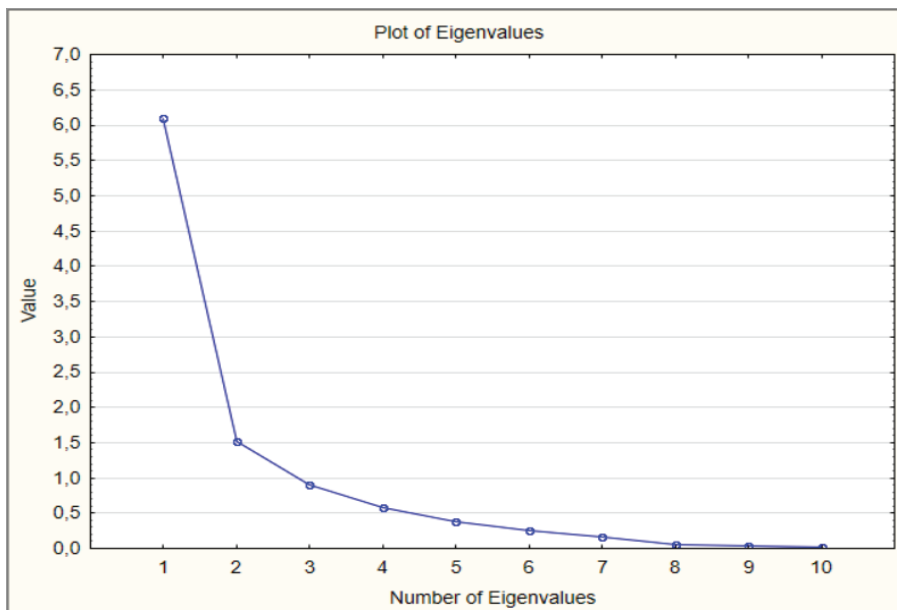


Fig. 3. Graph of changes in the values of eigenvalues

Variable	Factor Loadings (Varimax normalized) Extraction: Principal components (Marked loadings are >.700000)	
	Factor 1	Factor 2
LIA_13	0,798459	0,479739
IUI_13	0,872785	0,420706
IUB_13	0,872290	0,344405
IUSN_13	0,656681	0,423283
IUHI_13	0,868690	0,241796
IUOC_13	0,750467	-0,126887
EnOO_13	0,403668	0,574656
ETE_13	0,155992	0,845552
%GVA_13	0,045197	0,912312
%PTE_13	0,480607	0,786341
Expl.Var	4,329542	3,275326
Prp.Totl	0,432954	0,327533

Fig. 4. Factor loadings after rotation Varimax normalized

tation reflects the relationship between digitalization indicators and latent factors, which, in turn, allows us to summarize information about the digital behavior of the population and identify the structure of the digital economy.

It is the factor loadings obtained after Varimax rotation that allow us to give a meaningful interpretation to the two selected orthogonal factors that divided the variables into two clear clusters (Fig. 5):

Factor 1 is digital inclusion and digital skills (competences) of the population;

Factor 2 is business digitalization and digital economy (ICT economy).

Factor 1 includes the following digital inclusion indicators: LIA, IUI, IUB, IUSN, IUHI, and the digital competence indicator IUOC.

Factor 2 includes the following business digitalization indicators: EnOO, ETE, and digital economy indicators: %GVA, %PTE.

This distribution looks absolutely logical and expected for the digital transformation of EU countries. Fig. 6 shows the distribution of digitalization indicators in the space of two components according to 2013 data.

Factor 1 in Fig. 6 is highlighted by a green circle, and Factor 2 is highlighted by an orange one. As can be seen from the figure, the IUOC indicator is the most distant from other indicators of Factor 1, and the EnOO indicator from other indicators of Factor 2. This is also confirmed by the values of multiple correlation coefficients between variables and factors (Fig. 7).

Thus, the multiple correlation coefficient for the variable IUOC₁₃ = 0.479, and for the variable EnOO₁₃ = 0.605

The most significant for the interpretation and analysis of the impact of individual indicators on the processes of digital transformation within the framework of this study are the following indicators: LIA, IUI, IUB, IUHI, %PTE, %GVA.

So, in terms of the total impact of the indicators, the greatest contribution is made by Factor 1 – the factor of digital inclusion and digital competence of the population.

Similarly, the PCA method was applied for the following periods. So, in 2016, the situation is very similar to 2013: the principal component method identified two factors with very similar percentages of explained variance. For the first factor – 59.23%, for the second – 16.79%. The significance of the second factor increased almost imperceptibly – less than

Variable	Factor Loadings (Varimax normalized) (Digitalisation Dataset)	
	Factor 1	Factor 2
LIA_13	0,798459	0,479739
IUI_13	0,872785	0,420706
IUB_13	0,872290	0,344405
IUSN_13	0,656681	0,423283
IUHI_13	0,868690	0,241796
IUOC_13	0,750467	-0,126887
EnOO_13	0,403668	0,574656
ETE_13	0,155992	0,845552
%GVA_13	0,045197	0,912312
%PTE_13	0,480607	0,786341

Fig. 5. Clusters of factor loadings

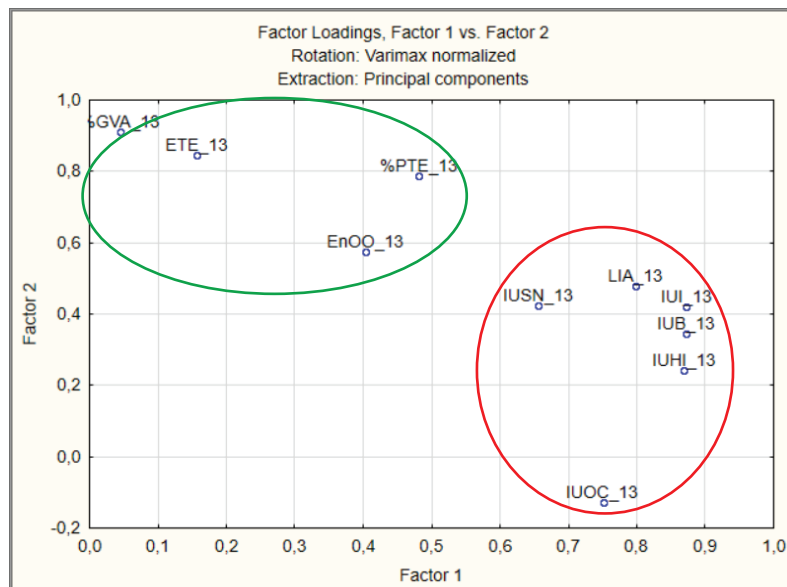


Fig. 6. Distribution of digitalization indicators in the space of two components (2013)

Variable	Communalities (Digitalisation Dataset)		
	From 1 Factor	From 2 Factors	Multiple R-Square
LIA_13	0,637536	0,867686	0,933539
IUI_13	0,761755	0,938748	0,971088
IUB_13	0,760890	0,879505	0,937708
IUSN_13	0,431230	0,610399	0,757728
IUHI_13	0,754623	0,813088	0,869534
IUOC_13	0,563201	0,579302	0,479028
EnOO_13	0,162948	0,493177	0,604523
ETE_13	0,024334	0,739292	0,720363
%GVA_13	0,002043	0,834356	0,884014
%PTE_13	0,230983	0,849315	0,932901

Fig. 7. General and multiple correlation coefficients

1.65%. Thus, it was again highlighted as follows: Factor 1 is digital inclusion and digital skills (competences) of the population; Factor 2 is digitalization of business and digital economy (ICT economy).

Instead, in 2020, 3 factors were highlighted: Factor 1 is digital inclusion and digital competencies; Factor 2 is digital economy; Factor 3 is digitalization of business.

Such significant changes are explained by the transformation of the economic space of EU countries due to the activation of online services during the pandemic. Therefore, the economies of all countries have undergone significant changes.

There is also a significant decrease in the significance of the impact of the indicator reflecting the use of the Internet for communication on social networks.

For the period 2024, we have a picture similar to 2020. The principal component method identified three orthogonal factors: the first factor explains 48.33% of the variance, the second factor explains 15.43%, and the third explains 11.61%.

Fig. 8 shows the factor loadings obtained after Varimax rotation.

Variable	Factor Loadings (Varimax normalized) Extraction: Principal components (Marked loadings are >.700000)		
	Factor 1	Factor 2	Factor 3
LIA_24	0,133012	0,005042	0,944076
IUI_24	0,492759	0,217388	0,782936
IUB_20	0,768904	0,194507	0,436635
IUSN_24	0,535942	0,085226	0,259982
IUHI_24	0,890603	0,017353	0,280515
IUOK_24	0,594359	0,406315	0,247650
EnOO_24	0,885016	0,189381	-0,203983
ETE_24	0,624486	0,062366	0,388071
%GVA_22	0,133271	0,923694	-0,072619
%PTE_22	0,118821	0,870055	0,197763
Expl.Var	3,490503	1,907735	2,139121
Prp.Totl	0,349050	0,190773	0,213912

Fig. 8. Factor loadings after rotation Varimax normalized

Thus, the following were identified:

Factor 1 – the factor of infrastructure and innovative activity of enterprises (IUHI_24 (0.89), EnOO_24 (0.885), IUB_20 (0.769), IUOK_24 (0.594), ETE_24 (0.624), IUSN_24 (0.536));

Factor 2 – the economic (industry) factor (%GVA_22 (0.924) and %PTE_22 (0.870));

Factor 3 – the factor of digital inclusion and Internet use (LIA_24 (0.944), IUI_24 (0.783)).

Fig. 9 visualizes this structure of the distribution of the initial indicators in the space of three principal components.

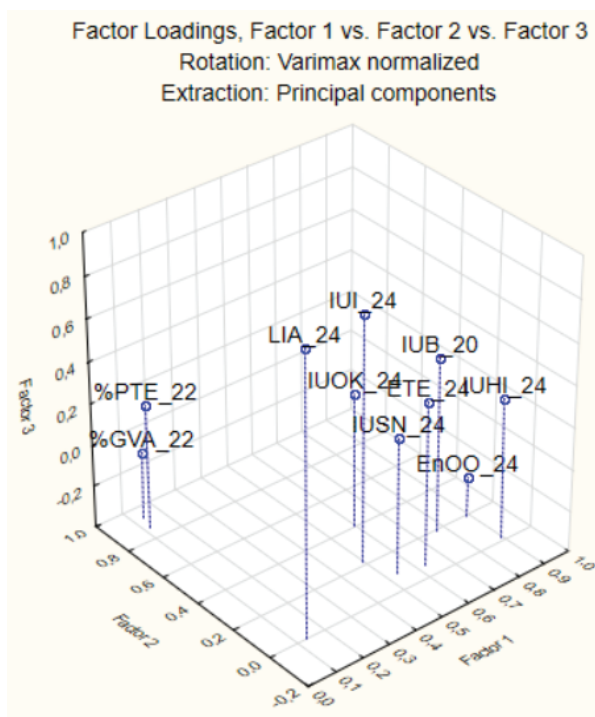


Fig. 9. Distribution of indicators in the space of three components (2024)

The multiple correlation coefficients also change (Fig. 10), which indicates a change in the influence of individual indicators on the overall level of digitalization.

All these changes testify to the active processes of digital transformation of EU countries.

CONCLUSIONS

Thus, a comprehensive theoretical and economic and mathematical study of the processes of digital transformation of the European Union countries was carried out, which allowed us to understand more deeply the nature of digital changes, identify their key drivers and identify patterns of the country's development in dynamics.

A structured system of digital development indicators relevant for the analysis of EU countries was formed. Also a correlation analysis of the indicated indicators was conducted, and structural connections between them were identified. Based on the principal component method, latent generalized factors of digital transformation were identified, which integrate numerous digital indicators into several key areas of development. This allows us to reduce the dimensionality of the data and isolate the main driving forces of digitalization.

In general, the results of the study confirmed that today digitalization is the basis for increasing the competitiveness, productivity and innovative activity of the economy. It was substantiated that digital transformation is a complex multidimensional process that re-

Variable	Communalities (Digitalisation Dataset) Extraction: Principal components Rotation: Varimax normalized			
	From 1 Factor	From 2 Factors	From 3 Factors	Multiple R-Square
LIA_24	0.017692	0.017718	0.908998	0.742836
IUI_24	0.242812	0.290069	0.903058	0.868907
IUB_20	0.591213	0.629046	0.819696	0.872780
IUSN_24	0.287234	0.294498	0.362088	0.497428
IUHI_24	0.793174	0.793475	0.872164	0.854937
IUOK_24	0.353262	0.518354	0.579685	0.671537
EnOO_24	0.783254	0.819119	0.860728	0.655927
ETE_24	0.389983	0.393872	0.544471	0.501848
%GVA_22	0.017761	0.870972	0.876246	0.698583
%PTE_22	0.014118	0.771115	0.810225	0.675981

Fig. 10. General and multiple correlation coefficients

quires systemic analysis and the application of modern Data Science and machine learning methods, which will allow assessing the effectiveness of public policy, comparative analysis of countries, and the formation of recommendations for accelerating digital progress. ■

BIBLIOGRAPHY

- 2030 digital compass: The European way for the digital decade. URL: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/d4220021-8d20-11eb-b85c-01aa75ed71a1/language-en>
- Bocean C. G., Värzaru A. A. EU countries' digital transformation, economic performance, and sustainability analysis. *Humanities and Social Sciences Communications*. 2023. Vol. 10. Art. 875. DOI: <https://doi.org/10.1057/s41599-023-02415-1>
- Cennamo C., Dagnino G. B., Di Minin A., Lanzolla G. Managing Digital Transformation: Scope of Transformation and Modalities of Value Co-Generation and Delivery. *California Management Review*. 2020. Vol. 62. Iss. 4. P. 4–16. DOI: <https://doi.org/10.1177/0008125620942136>
- Chagovets L., Prokopovych S., Panasenکو O., Chagovets V. The Use of Data Science Models to Analyze the Development State of the EU and Ukraine IT Sector. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2023. № 6. С. 429–436. DOI: <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2023-329-6-429-436>
- De Rojas F. H., Pita P. R., Martínez J. E. P. Assessing the European association between digitalization and innovation. *Telecommunications Policy*. 2024. Vol. 48. Iss. 7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2024.102810>
- Digital Decade Policy Programme 2030. *European Commission*. URL: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/digital-decade-policy-programme-2030>
- Duarte M. P., Pereira F. M., de Carvalho O. How digital transformation shapes European union coun-

- tries' national systems of innovation: A configurational moderation approach. *Journal of Innovation & Knowledge*. 2024. Vol. 9. Iss. 4. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jik.2024.100578>
- Eurostat. *Database*. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/data/database>
- Stavytskyy A., Kharlamova G., Stoica E. A. The analysis of the digital economy and society index in the EU. *TalTech Journal of European Studies*. 2019. Vol. 9. Iss. 3. P. 245–261. DOI: <https://doi.org/10.1515/bjes-2019-0032>
- The Digital Economy and Society Index (DESI). *European Commission*. URL: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/desi>
- Струтинська І. Метрики цифрової трансформації бізнесу: світові та вітчизняні реалії. *Галицький економічний вісник*. 2019. № 6. С. 30–45. DOI: https://doi.org/10.33108/galicianvisnyk_tntu 2019.06.030
- Чеснокова Н. В. Методологічні підходи до оцінки цифрової трансформації економіки. *Ринкова економіка: сучасна теорія і практика управління*. 2020. Т. 19. Вип. 2. С. 413–427. DOI: [https://www.doi.org/10.18524/2413-9998/2020.2\(45\).201932](https://www.doi.org/10.18524/2413-9998/2020.2(45).201932)

REFERENCES

- Bocean C. G. & Värzaru A. A. (2023). EU countries' digital transformation, economic performance, and sustainability analysis. *Humanities and Social Sciences Communications*, 10. Art. 875. <https://doi.org/10.1057/s41599-023-02415-1>
- Cennamo C., Dagnino G. B., Di Minin A. & Lanzolla G. (2020). Managing Digital Transformation: Scope of Transformation and Modalities of Value Co-Generation and Delivery. *California Management Review*, 4(62), 4–16. <https://doi.org/10.1177/0008125620942136>
- Chagovets L., Prokopovych S., Panasenکو O. & Chagovets V. (2023). The Use of Data Science Models to An-

alyze the Development State of the EU and Ukraine IT Sector. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu*, 6, 429–436. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-329-6-429-436>

Chesnokova N. V. (2020). Metodolohichni pidkhody do otsinky tsyfrovoy transformatsii ekonomiky [Methodological approaches to the assessment of digital transformation of the economy]. *Rynkova ekonomika: suchasna teoriia i praktyka upravlinnia*, 2(19), 413–427. [https://doi.org/10.18524/2413-9998/2020.2\(45\).201932](https://doi.org/10.18524/2413-9998/2020.2(45).201932)

De Rojas F. H., Pita P. R. & Martinez J. E. P. (2024). Assessing the European association between digitalization and innovation. *Telecommunications Policy*, 7(48). <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2024.102810>

Duarte M. P., Pereira F. M. & de Carvalho O. (2024). How digital transformation shapes European union countries' national systems of innovation: A configurational moderation approach. *Journal of Innovation & Knowledge*, 4(9). <https://doi.org/10.1016/j.jik.2024.100578>

European Commission. *The Digital Economy and Society Index (DESI)*. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/desi>

European Commission. *Digital Decade Policy Programme 2030*. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/digital-decade-policy-programme-2030>

Eurostat. *Database*. <https://ec.europa.eu/eurostat/data/database>

Stavytskyy A., Kharlamova G. & Stoica E. A. (2019). The analysis of the digital economy and society index in the EU. *TalTech Journal of European Studies*, 3(9), 245–261. <https://doi.org/10.1515/bjes-2019-0032>

Strutynska I. (2019). Metryky tsyfrovoy transformatsii biznesu: svitovi ta vitchyzniani realii [Metrics of business digital transformation: world and domestic realities]. *Halytskyi ekonomichnyi visnyk*, 6, 30–45. https://doi.org/10.33108/galicianvisnyk_tntu2019.06.030

2030 digital compass: The European way for the digital decade. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/d4220021-8d20-11eb-b85c-01aa75ed71a1/language-en>

Стаття надійшла до редакції / Received: 23.02.2026
Статтю прийнято до публікації / Accepted: 07.03.2026
Оприлюднено / Published: 30.04.2026

УДК 351.82:338.2:339.9:005.3

JEL: D81; H54; H83; R58

DOI: <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2026-3-113-127>

РЕЗИЛЬЄНТНІСТЬ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ НА МУНІЦИПАЛЬНОМУ РІВНІ: ДОСВІД ГМІН ПОЛЬЩІ*

©2026 ХАУСТОВА В. Є., ТРУШКІНА Н. В., КАЛАШНІКОВА К. Ю.

УДК 351.82:338.2:339.9:005.3

JEL: D81; H54; H83; R58

Хаустова В. Є., Трушкіна Н. В., Калашнікова К. Ю. Резильєнтність критичної інфраструктури на муніципальному рівні: досвід гмін Польщі

У статті здійснено дослідження й аналітичне узагальнення досвіду гмін Польщі щодо забезпечення резильєнтності критичної інфраструктури на муніципальному рівні в умовах зростання природних, техногенних, кібернетичних і гібридних загроз. Обґрунтовано, що сучасний підхід до управління критичною інфраструктурою поступово зміщується від об'єктно-орієнтованої логіки захисту інфраструктурних елементів до сервісної логіки управління безперервністю життєво важливих послуг, які безпосередньо визначають соціально-економічну стійкість територіальних громад. Показано, що на муніципальному рівні резильєнтність критичної інфраструктури формується як інтегрована система публічного управління, у межах якої гміна, не будучи оператором інфраструктурних мереж, виконує ключові координуючі, організаційну та комунікаційну функції. На основі аналізу інституційної архітектури кризового управління в Польщі визначено роль гмін у забезпеченні готовності, реагування та відновлення життєво важливих послуг у взаємодії з операторами, екстреними службами та населенням. Наведено практичні приклади муніципального управління резильєнтністю у Варшаві, Вроцлаві та Кракові, які демонструють значущість завчасно підготовлених механізмів оповіщення, мережевої координації на локальному рівні, інституційної визначеності кризових функцій і чітких регламентів реагування. Доведено, що ефективна резильєнтність на рівні гмін базується на поєднанні інституційної чіткості багаторівневого управління, сервісно орієнтованого планування, стійкої міжвідомчої взаємодії, сценарного підходу до реагування та використання вимірюваних показників готовності, реагування та відновлення. Запропоновано систему ключових показників ефективності (КПІ), яка забезпечує регулярний моніторинг резильєнтності життєво важливих послуг, проведення внутрішнього аудиту управлінських практик і міжмуніципальних порівнянь. Сформульовано практичні рекомендації щодо забезпечення резильєнтності критичної інфраструктури на муніципальному рівні, що передбачають інституційне посилення ролі гміни в досягненні безперервності життєво важливих послуг; застосування сервісно орієнтованого підходу до планування; розвиток мережевої взаємодії та кризової координації; використання сценарного й антикризового підходів в управлінні; запровадження системи моніторингу та оцінювання резильєнтності; зміцнення людського та організаційного потенціалу місцевого самоврядування. Обґрунтовано, що польський досвід є релевантним для України з огляду на децентралізовану модель управління та актуальність забезпечення безперервності базових сервісів в умовах воєнних дій і повоєнного відновлення.