

**Authors' contribution/
 Wkład autorów:**
**A. Study design/
 Zaplanowanie badań**
**B. Data collection/
 Zebranie danych**
**C. Statistical analysis/
 Analiza statystyczna**
**D. Data interpretation/
 Interpretacja danych**
**E. Manuscript preparation/
 Przygotowanie tekstu**
**F. Literature search/
 Opracowanie
 piśmiennictwa**
**G. Funds collection/
 Pozyskanie funduszy**

**MACROECONOMIC CONTEXT AND SMART LOGISTICS
 ADOPTION – STUDY OF POLAND AND LITHUANIA**

**MAKROEKONOMICZNE UWARUNKOWANIA A ADOPCJA
 SMART-LOGISTYKI – STUDIUM POLSKI I LITWY**

Mariusz Pyra¹, Jurgita Paužuolienė², Ieva Kaveckė²

¹ Faculty of Economics, Department of Logistics John Paul II University
 in Białą Podlaską, Poland

¹ Wydział Ekonomii, Zakład Logistyki Akademia Bialska im. Jana Pawła II, Polska

² Faculty of Business, Department of Business Administration, Higher Education
 Institution, Klaipėdos Valstybinė Kolegija, Klaipėda, Lithuania

² Wydział Biznesu, Katedra Administracji Biznesu, Uczelnia Wyższa, Klaipėdos
 Valstybinė Elektroja, Klaipėda, Litwa

ORIGINAL ARTICLE
 JEL code: O33, L91, C21
 Submitted:
 August, 2025
 Accepted:
 October, 2025

Tables: 4
 Figures: 0
 References: 22

ORYGINALNY ARTYKUŁ
 NAUKOWY
 Klasyfikacja JEL: O33,
 L91, C21
 Zgłoszony:
 sierpień, 2025
 Zaakceptowany:
 październik, 2025

Tabele: 4
 Rysunki: 0
 Literatura: 32

Citation: Pyra, M., Paužuolienė, J., Kaveckė, I., (2025). Macroeconomic context and smart logistics adoption - study of Poland and Lithuania / Makroekonomiczne uwarunkowania a adopcja smart-logistyki – studium Polski i Litwy. *Economic and Regional Studies / Studia Ekonomiczne i Regionalne*, 18(4), 510-533, <https://doi.org/10.2478/ers-2025-0035>

Abstract

Subject and purpose of work: The article examines the relationship between macroeconomic conditions (GDP per capita, Logistics Performance Index, unemployment) and the adoption of smart technologies in logistics at the enterprise level in Poland and Lithuania.

Materials and methods: The materials included primary data from the CAWI survey and secondary data from public macroeconomic sources. Descriptive statistics and tests of differences between countries were used. Linear relationships were assessed using Pearson's correlation coefficients. The relationships were verified using OLS regression models.

Results: The IATL level is higher in Poland than in Lithuania. The LPI shows a strong positive correlation with the IATL, unemployment shows a negative correlation, while GDP per capita does not translate into greater adoption. The interaction effect of $\log \text{GDPpc} \times \text{LPI}$ is positive.

Conclusions: Economic prosperity alone does not guarantee the digitisation of logistics. The key factor is the quality of logistics infrastructure and services (LPI), while labour market tensions modulate the propensity to invest.

Keywords: digital transformation, technology adoption, LPI, smart logistics, OLS regression

Streszczenie

Przedmiot i cel pracy: Artykuł bada zależność między uwarunkowaniami makroekonomicznymi (PKB per capita, Logistics Performance Index, bezrobocie) a adopcją inteligentnych technologii w logistyce na poziomie przedsiębiorstw w Polsce i Litwie.

Materiały i metody: Materiały obejmowały dane pierwotne z ankiety CAWI oraz dane wtórne z publicznych źródeł makroekonomicznych. Zastosowano statystykę opisową oraz testy różnic

Address for correspondence / Adres korespondencyjny: Mariusz Pyra, Wydział Nauk Ekonomicznych, Akademia Bialska im. Jana Pawła II Polska (e-mail: m.pyra@dyd.akademibialska.pl), ORCID 0000-0001-8246-851X

Journal included in: AgEcon Search; AGRO; Arianta; Baidu Scholar; BazEkon; Cabell's Journalytics; CABI; CNKI Scholar; CNPIEC – cnpLINKer; Dimensions; DOAJ; EBSCO; ERIH PLUS; ExLibris; Google Scholar; Index Copernicus International; J-Gate; JournalTOCs; KESLI-NDSL; MIAR; MyScienceWork; Naver Academic; Naviga (Softweco); Polish Ministry of Science and Higher Education; QOAM; ReadCube, Research Papers in Economics (RePEc); SCILIT; Scite; SCOPUS, Semantic Scholar; Sherpa/RoMEO; TDNet; Ulrich's PeriodicalsDirectory/ulrichsweb; WanFang Data; WorldCat (OCLC); X-MOL

Copyright: © 2025, The Authors. Publisher: John Paul II University in Białą Podlaską, Poland

między krajami. Zależności liniowe oceniono współczynnikami korelacji Pearsona. Weryfikację zależności przeprowadzono w modelach regresji OLS.

Wyniki: Poziom IATL jest wyższy w Polsce niż w Litwie. LPI wykazuje silny dodatni związek z IATL, bezrobocie – ujemny, natomiast PKB per capita nie przekłada się na większą adopcję. Efekt interakcji $\log \text{GDPpc} \times \text{LPI}$ jest dodatni.

Wnioski: Sama zamożność gospodarki nie gwarantuje cyfryzacji logistyki. Kluczowym czynnikiem jest jakość infrastruktury i usług logistycznych (LPI), a napięcia na rynku pracy modulują skłonność do inwestycji.

Słowa kluczowe: transformacja cyfrowa, smart – logistyka, LPI, adopcja technologii, regresja OLS

Introduction

The dynamic digitalization of supply chains changes the way logistics operations are designed and performed. The literature describes how smart solutions – from real-time transmission and control systems, through warehouse automation, to load-placement automation – improve operational efficiency and reduce resources and emissions, including the additional side effects of the TSL development (Angelo, 2024; Pan et al., 2020). These benefits are particularly evident when they are well-integrated with organizational practices and competence of enterprises.

At the same time, the macroeconomic environment of technological projects is increasingly attracting the attention of researchers. It is indicated that the progress of digitalization as such is not disconnected. Its pace and locational capacity are affected by the quality of a country's logistics infrastructure and services, overall levels of economic development, and the labor market situation (Andrews et al., 2018; Comin et al., 2004). There is an extensive stream of research examining the existing macroeconomic applications of technology adoption (Dirir, 2023; Hooks et al., 2022). Logistics and supply chain systems combine parallel adoption measures at a company level with macroeconomic determinants and logical quality metrics (e.g., LPI) in a single empirical model.

The importance of macroeconomic indicators such as GDP per capita, urbanisation levels and the Logistics Performance Index is also increasingly recognised as a predictor of the pace and scope of smart technology implementation in the logistics sector. Research has shown that economic growth, trade access, and investment in innovation accelerate smart logistics adoption, which translates into improved delivery

Wstęp

Dynamiczna cyfryzacja łańcuchów dostaw zmienia sposób projektowania i wykonywania operacji logistycznych. W literaturze konsekwentnie podkreśla się, że rozwiązania klasy smart – od systemów planowania tras i analityki czasu rzeczywistego, przez automatyzację magazynów, po śledzenie ładunku – pozwalają jednocześnie podnosić efektywność operacyjną i redukować zużycie zasobów oraz emisje, a więc wspierać cele zrównoważonego rozwoju sektora TSL (Angelo, 2024; Pan i in., 2020). Korzyści te są szczególnie widoczne, gdy wdrożenia są dobrze zintegrowane z praktykami operacyjnymi i kompetencjami organizacyjnymi przedsiębiorstw.

Jednocześnie coraz większą uwagę badawczą przyciąga makroekonomiczne otoczenie wdrożeń technologicznych. Wskazuje się, że sam postęp cyfryzacji nie jest zjawiskiem autonomicznym. Jego tempo i głębokość mogą zależeć od jakości infrastruktury i usług logistycznych w kraju, ogólnego poziomu rozwoju gospodarczego oraz sytuacji na rynku pracy (Andrews i in., 2018; Comin i in., 2004). Choć istnieje rozbudowany nurt badań poświęcony uwarunkowaniom makroekonomicznym adopcji technologii (Dirir, 2023; Hooks i in., 2022), to w obszarze logistyki i łańcuchów dostaw rzadziej łączy się jednocześnie wskaźniki adopcji na poziomie firm z makro wyznacznikami oraz miernikami jakości otoczenia logistycznego (np. LPI) w jednym porównawczym modelu empirycznym.

Coraz częściej podkreśla się również znaczenie wskaźników makroekonomicznych, takich jak PKB per capita, poziom urbanizacji czy Logistics Performance Index, jako predyktorów tempa i zakresu wdrożeń technologii inteligentnych w sektorze logistycznym. W literaturze naukowej wykazano, że wzrost gospodarczy, otwartość

performance and competitiveness of enterprises in the international market (Ohakwe et al., 2025).

Technologies such as AI, IoT, and blockchain are increasingly integrated into operational processes, enabling real-time tracking, predictive risk analysis, routing optimization, and automated inventory management. A review of smart logistics applications shows that smart systems enable transmission after the implementation and the need for the development of this solution. These practices are confirmed in studies describing the transformation of global logistics companies, as well as in empirical sector studies – the technology's impact is particularly strong where the economic environment and infrastructure are well-developed (Idrissi et al., 2024).

Furthermore, the development of digital logistics is a driver of socio-economic change, creating new jobs related to IT systems support, data analytics and logistics platform management. However, the literature also indicates challenges such as the need for increased authorization, changes in employment structures, and the risk of cyber threats. Effective adoption of smart technologies requires the support of public policy and strategic management within enterprises (Mao, 2024).

This paper contributes to this trend, drawing on empirical evidence from the Polish-Lithuanian research project on smart technologies and their links with advanced logistics practices. The project was developed in collaboration with the Lithuanian centre and aims to assess the use of smart technologies in logistics companies in Poland and Lithuania in comparative terms, taking into account their background (Pyra et al., 2025).

Supply chain digitalization has been accelerating, and “smart” solutions are among the key vectors of advantage for TSL companies. The adoption rate is not a company-specific decision; it depends on macroeconomic applications and the quality of logistics equipment. However, in Central and Eastern Europe, there is a lack of research linking the micro level (technology adoption in companies) with the macro level (GDP per capita, LPI, unemployment) in quantitative and comparative terms within a single empirical model. This article addresses these gaps, using the IATL index key and data for Poland and Lithuania to explain when and why corporate digitalization

handlowa oraz inwestycje w innowacje przyspieszają implementację rozwiązań smart w logistyce, co przekłada się na poprawę wydajności łańcuchów dostaw oraz konkurencyjności przedsiębiorstw na rynku międzynarodowym (Ohakwe i in., 2025).

Technologie takie jak AI, IoT oraz blockchain coraz bardziej integrują się w procesach operacyjnych, zapewniając real-time tracking, predycyjne analizowanie ryzyka, optymalizację routingu oraz automatyczne zarządzanie zapasami. Przegląd aplikacji smart logistics pokazuje, że wdrożenie inteligentnych systemów pozwala na redukcję kosztów operacyjnych, zwiększenie dokładności realizacji zamówień oraz lepsze dostosowanie do wymogów zrównoważonego rozwoju. Praktyki te znajdują potwierdzenie zarówno w badaniach opisujących transformację globalnych firm logistycznych, jak i w empirycznych studiach sektorowych – siła oddziaływania technologii rośnie szczególnie tam, gdzie otoczenie gospodarcze oraz infrastruktura są na wysokim poziomie rozwoju (Idrissi i in., 2024).

Ponadto, rozwój cyfrowej logistyki jest katalizatorem zmian społeczno-gospodarczych, tworząc nowe miejsca pracy związane z obsługą systemów IT, analityką danych i zarządzaniem platformami logistycznymi. Jednak literatura wskazuje też na wyzwania, takie jak konieczność wzrostu kompetencji kadry, zmiany struktury zatrudnienia czy rosnące ryzyko cyberzagrożeń. Dlatego skuteczna adopcja inteligentnych technologii wymaga wsparcia zarówno ze strony polityki publicznej, jak i strategicznego zarządzania wewnątrz przedsiębiorstw (Mao, 2024).

Artykuł wpisuje się w ten nurt, wykorzystując materiał empiryczny z polsko-litewskiego projektu badawczego poświęconego wykorzystaniu technologii inteligentnych i ich związkom z praktykami zrównoważonej logistyki. Projekt został zainicjowany we współpracy z ośrodkiem litewskim, a jego celem jest porównawcza ocena wykorzystania rozwiązań smart w przedsiębiorstwach logistycznych Polski i Litwy, ze szczególnym uwzględnieniem uwarunkowań kontekstowych (Pyra i in., 2025).

Cyfryzacja łańcuchów dostaw przyspiesza, a wdrożenia rozwiązań „smart” stają się jednym z głównych wektorów przewagi konkurencyjnej firm TSL. Jednocześnie tempo adopcji nie jest

is growing (or not) alongside affluence and the quality of logistics infrastructure.

Existing studies have focused on the effects of selected projects implemented at the company level rather than on the determinants of adoption at the macro level. They rarely test micro-macro relationships in a single comparative framework for Central and Eastern European countries (including the Poland-Lithuania pair), and they do not verify the moderation mechanism empirically: whether and how LPI strengthens (or weakens) the relationship between affluence (log GDP per capita) and the intensity of adoption in companies. Furthermore, they rarely operate in a coherent, reliable manner.

This article addresses this shortcoming by using the original IATL index and data for Poland and Lithuania to explain when and why digitalization of companies increases (or not) along with affluence and the quality of logistics infrastructure.

Previous studies have focused more on the effects of selected projects at the company level than on the macro-level determinants of adoption. They rarely test micro-macro relationships within a single comparative framework for Central and Eastern European countries (including the Poland-Lithuania pair), and they do not empirically verify the moderation mechanism: whether and how the LPI strengthens (or weakens) the relationship between affluence (log GDP per capita) and the intensity of adoption in companies. Furthermore, they rarely use a consistent, reliable adoption index with verification of unidimensionality and reliability.

The contribution of the article includes the development and empirical justification of the IATL index on micro-data, linking these data to macro-predictors, and conducting a moderation test of the LPI in the OLS model with controls for company characteristics and country-level error clustering. This allows for quantitative verification of whether the quality of the logistical environment determines the translation of affluence into digitalization of companies.

The aim of this study is to explain empirically the diversity in the intensity of logistics technology adoption among Polish and Lithuanian enterprises by assessing the impact of log GDP, LPI, and the unemployment rate, and to verify whether LPI moderates the affluence-adoption relationship at

jedynie funkcją decyzji pojedynczych przedsiębiorstw – zależy również od uwarunkowań makroekonomicznych i jakości otoczenia logistycznego. W Europie Środkowo – Wschodniej brakuje jednak badań, które ilościowo i porównawczo łączą poziom mikro (adopcja technologii w firmach) z poziomem makro (PKB per capita, LPI, bezrobocie) w ramach jednego modelu empirycznego. Tekst tego artykułu odpowiada na ten niedosyt, wykorzystując oryginalny indeks IATL oraz dane dla Polski i Litwy, aby wyjaśnić kiedy i dlaczego firmowa cyfryzacja rośnie (lub nie) wraz z dobrobytem i jakością infrastruktury logistycznej.

Dotychczasowe prace koncentrują się częściej na efektach wybranych wdrożeń na poziomie firmy niż na determinantach adopcji po stronie otoczenia makro. Rzadko testują relacje mikro-makro w jednym układzie porównawczym dla państw Europy Środkowo – Wschodniej (w tym pary Polska-Litwa), nie weryfikują empirycznie mechanizmu moderacji: czy i jak LPI wzmacnia (lub osłabia) związek pomiędzy zamożnością (log PKB per capita) a intensywnością adopcji w firmach. Ponadto sporadycznie operują spójnym, rzetelnym indeksem adopcji z weryfikacją jednowymiarowości i rzetelności.

Wkład artykułu obejmuje opracowanie i empiryczne uzasadnienie wskaźnika IATL na danych mikro, powiązanie tych danych z makropredyktorami oraz przeprowadzenie testu moderacji LPI w modelu OLS z kontrolami cech firm i klastrowaniem błędów na poziomie kraju. Dzięki temu w sposób ilościowy weryfikuje się, czy jakość otoczenia logistycznego warunkuje przełożenie zamożności na cyfryzację firm.

Celem pracy jest empiryczne wyjaśnienie zróżnicowania intensywności adopcji technologii logistycznych w przedsiębiorstwach Polski i Litwy poprzez ocenę wpływu log PKB, LPI i stopy bezrobocia oraz sprawdzenie, czy LPI moduluje relację zamożność – adopcja na poziomie firm. Cel zoperacjonalizowano następująco:

- P1. Czy poziom zamożności kraju (log PKBpc) wiąże się z IATL na poziomie firm?
- P2. Czy jakość infrastruktury i usług logistycznych (LPI) wzmacnia związek log PKBpc – IATL?
- P3. Jak kształtuje się związek stopy bezrobocia z IATL po kontrolach cech firm?

a company level. The objective is operationalized as follows:

P1. Is the level of national affluence (log GDPpc) associated with IATL at the company level?

P2. Does the quality of logistics infrastructure and services (LPI) strengthen the relationship between log GDPpc and IATL?

P3. What is the relationship between the unemployment rate and IATL after controlling the characteristics of companies?

The literature assumes that a higher level of economic affluence promotes technology adoption via several channels. Firstly, according to the TOE (Technology-Organization-Environment) framework, the "Environment" component encompasses the availability of financial resources and institutional facilities that reduce investment barriers for companies (DePietro et al., 1990). Secondly, the absorptive capacity theory suggests that more affluent environments generate increased knowledge and human resources (training, consulting services), which enhances the likelihood of successful implementation of digital solutions (Zahra et al., 2002). Thirdly, in the resource-based theory (RBV) and knowledge-based economy framework, income growth fosters the accumulation of intangible assets (analytical competence, data, procedures), which are complementary to "smart" technologies (Wade et al., 2004). Finally, complex demand mechanisms (Linder's hypothesis) suggest that more affluent markets create a more challenging demand for higher-quality logistics services, which rewards digitization and process automation (Linder, 1961). Consequently, a positive relationship between wealth (log GDPpc) and the intensity of technology adoption at the firm level (IATL) is expected, although the strength of this relationship may depend on the quality of complementary infrastructural and institutional elements.

The quality of logistics infrastructure and services, measured by the LPI, reduces transaction costs, increases the predictability and reliability of flows and facilitates data interoperability (Arvis et al., 2018). From the perspective of the complementarity theory (e.g., the complementarity of technologies and organizational practices), infrastructural resources act as a "leverage" for private investment in technology – the better the logistics environment, the higher the rate of return on

W literaturze przyjmuje się, że wyższy poziom zamożności gospodarki sprzyja adopcji technologii poprzez kilka kanałów. Po pierwsze, zgodnie z ujęciem TOE (Technology-Organization-Environment), komponent „Environment” obejmuje dostępność zasobów finansowych i instytucjonalnych ułatwień, które obniżają bariery inwestycyjne dla firm (DePietro i in., 1990). Po drugie, teoria zdolności absorpcyjnej wskazuje, iż bogatsze otoczenia generują większe zasoby wiedzy i kadr (szkolenia, usługi doradcze), co zwiększa prawdopodobieństwo skutecznego wdrożenia rozwiązań cyfrowych (Zahra i in., 2002). Po trzecie, w ujęciu teorii zasobowej (RBV) oraz gospodarki opartej na wiedzy, wzrost dochodu sprzyja akumulacji aktywów niematerialnych (kompetencje analityczne, dane, procedury), które są komplementarne wobec technologii „smart” (Wade i in., 2004). Wreszcie, mechanizmy popytu złożonego (hipoteza Linderowska) sugerują, że bogatsze rynki tworzą bardziej wymagający popyt na usługi logistyczne o wyższej jakości, co premiuje cyfryzację i automatyzację procesów (Linder, 1961). W konsekwencji oczekiwany jest dodatni związek zamożności (log PKBpc) z intensywnością adopcji technologii na poziomie firm (IATL), przy czym siła tego związku może zależeć od jakości komplementarnych elementów infrastrukturalnych i instytucjonalnych.

Jakość infrastruktury i usług logistycznych, mierzona LPI, redukuje koszty transakcyjne, zwiększa przewidywalność i niezawodność przepływów oraz ułatwia interoperacyjność danych (Arvis i in., 2018). Z perspektywy teorii komplementarności (np. komplementarność technologii i praktyk organizacyjnych) zasoby infrastrukturalne działają jak „dźwignia” dla prywatnych nakładów na technologię – im lepsze otoczenie logistyczne, tym większa stopa zwrotu z inwestycji w rozwiązania cyfrowe po stronie firm (Milgrom i in., 1990). W ujęciu systemowym (narodowe i regionalne systemy innowacji) LPI można traktować jako element „twardych” i „miękkich” warunków dyfuzji (fizyczna infrastruktura, jakość usług, standardy operacyjne), które umożliwiają skalowanie i ucyfrowienie procesów w łańcuchach dostaw.

Relacje między warunkami rynku pracy a automatyzacją/cyfryzacją opisuje literatura

investment in digital solutions for companies (Milgrom et al., 1990). In systemic terms (national and regional innovation systems), LPI can be treated as an element of “hard” and “soft” diffusion conditions (physical infrastructure, quality of services, operational standards) that enable the scaling and digitization of supply chain processes. The relationship between labor market conditions and automation/digitalization is described in literature on labour substitution by technology and shifts in demand for skills (Autor et al., 2003). Lower labour availability and/or rising wage pressure typically increase incentives to invest in labour-saving technologies; on the other hand, at higher unemployment, this pressure weakens and companies are more likely to postpone costly projects. From the perspective of TCE and technology choice models, higher unemployment decreases the opportunity cost of maintaining work processes with a lower degree of automation, which reduces the immediate profitability of investment in smart logistics (Acemoglu et al., 2018). At the same time, the literature indicates potential bi-directional effects (e.g., implementations enforced by competition or public policy), justifying controlling of company characteristics and considering the relationships within a multidimensional model (Graetz et al., 2018). Based on the indicated conceptual framework and mechanisms, three research hypotheses were formulated:

H1: A higher level of economic affluence, measured by the logarithm of GDP per capita, is positively linked with the intensity of adoption of smart logistics technologies at an enterprise level (IATL).

H2: The quality of logistics infrastructure and services, captured by the LPI, modifies the relationship described in H1 – the higher the LPI, the stronger the relationship between $\log(\text{GDP pc})$ and IATL (moderating effect).

H3: A higher unemployment rate in the economy negatively correlates with IATL, reflecting weaker investment pressure and competence constraints.

The operationalization of the variables is presented in the next section. This section also describes the hypothesis testing procedure, including descriptive statistics, difference tests, Pearson correlations and the estimation of OLS models with the $\log(\text{GDP pc}) \times \text{LPI}$ interaction and country-level clustering errors.

o substytucji pracy technologią i przedstawieniach popytu na umiejętności (Autor i in., 2003). Niższa dostępność pracy i/lub rosnąca presja płacowa zwykle zwiększają bodźce do inwestycji w technologie oszczędzające pracę; odwrotnie, przy wyższym bezrobociu presja ta słabnie, a firmy częściej odkładają kosztowne wdrożenia. Z perspektywy TCE oraz modeli wyboru technologii, wyższe bezrobocie obniża koszt alternatywny utrzymywania procesów pracy o niższym stopniu automatyzacji, co redukuje natychmiastową opłacalność inwestycji w smart Logistics (Acemoglu i in., 2018). Jednocześnie literatura wskazuje na możliwe efekty dwukierunkowe (np. wdrożenia wymuszane konkurencją lub polityką publiczną), co uzasadnia kontrolę cech firm oraz ujęcie relacji w ramach modelu wielowymiarowego (Graetz i in., 2018).

Na gruncie wskazanych ram koncepcyjnych i mechanizmów sformułowano trzy hipotezy badawcze:

H1: wyższy poziom zamożności gospodarki, mierzony logarytmem PKB per capita, wiąże się dodatnio z intensywnością adopcji inteligentnych technologii logistycznych na poziomie przedsiębiorstwa (IATL).

H2: jakość infrastruktury i usług logistycznych ujęta wskaźnikiem LPI modyfikuje relację opisaną w H1 – im wyższy LPI, tym silniejszy związek między $\log(\text{PKB pc})$ a IATL (efekt moderacyjny).

H3: wyższa stopa bezrobocia w gospodarce koreluje ujemnie z IATL, co odzwierciedla słabszą presję inwestycyjną i ograniczenia kompetencyjne.

Operacjonalizację zmiennych przedstawiono w kolejnej sekcji. W tej samej części artykułu opisano także procedurę weryfikacji hipotez, obejmującą statystykę opisową, testy różnic, korelacje Pearsona oraz estymację modeli OLS z interakcją $\log(\text{PKB pc}) \times \text{LPI}$ i błędami klastrizowanymi na poziomie kraju.

Wkład artykułu ma charakter dwójaki. Po pierwsze, na danych mikro z badania ankietowego firm TSL zbudowano spójny indeks adopcji technologii logistycznych (IATL), który traktuje się jako miarę intensywności wdrożeń na poziomie przedsiębiorstwa. Po drugie, połączono te dane z wskaźnikami makro (PKB per capita, LPI, stopa bezrobocia), aby ilościowo

The contribution of this article is twofold. Firstly, a coherent index of logistics technology adoption (IATL) has been constructed based on micro-data from the survey of transport and logistics companies, which serves as a measure of implementation intensity at a company level. Secondly, this data was combined with macro-level indicators (GDP per capita, LPI, unemployment rate) to assess in quantitative terms the relationship between the national context and companies' propensity to implement and to test whether the quality of logistics infrastructure modifies the relationship between the economic affluence and technology adoption. Consequently, this paper provides an empirical answer to the question of the extent to which the "environmental conditions" strengthen or undermine the technological decisions of logistics companies in two neighbouring EU economies.

Research Methodology

The population comprised all logistics companies operating in Poland. The sampling frame was created based on the KOMPASS business database (N=862 entities; suspended entities and entities without an active email address were excluded). The survey was conducted using the CAWI method between October and November 2024.

The survey covered companies representing various segments of the TSL (transport, forwarding, and logistics) sector. The sample included companies providing road transport and courier services, as well as logistics operators, distribution centres and warehousing companies. A small part comprised e-commerce and last-mile logistics providers. The structure of the sample reflects the prevailing nature of the sector in Poland and Lithuania, dominated by small and medium-sized enterprises with a national footprint, providing transport, forwarding, and warehousing services. In Poland, companies from the Eastern and Central regions prevailed, while the Lithuanian sample was dominated by companies from the Vilnius, Kaunas and Klaipėda areas. This structure allows for the analysis of diversification within the logistics sector and the assessment of the impact of macro-level factors on micro-level technological decisions.

ocenić zależności między kontekstem krajowym a skłonnością firm do wdrożeń oraz sprawdzić, czy jakość infrastruktury logistycznej modyfikuje związek między dobrobytem gospodarczym a adopcją technologii. Tym samym artykuł dostarcza empirycznej odpowiedzi na pytanie, w jakim stopniu „warunki otoczenia” wzmacniają lub osłabiają decyzje technologiczne przedsiębiorstw logistycznych w dwóch sąsiadujących gospodarkach UE.

Metodyka badań

Populację stanowiły wszystkie przedsiębiorstwa logistyczne działające w Polsce. Ramę doboru utworzono na podstawie bazy biznesowej KOMPASS (N=862 podmioty; podmioty zawieszone i bez aktywnego adresu e-mail wykluczono). Badanie zrealizowano metodą CAWI w okresie październik-listopad 2024 r.

Badaniem objęto przedsiębiorstwa reprezentujące różne segmenty sektora TSL (transport – spedycja – logistyka). W próbie znalazły się zarówno firmy świadczące usługi transportu drogowego i kurierskiego, jak i operatorzy logistyczni, centra dystrybucyjne oraz przedsiębiorstwa magazynowe. Niewielki udział stanowiły podmioty zajmujące się obsługą e-commerce i logistyką ostatniej mili. Struktura próby odzwierciedla dominujący w Polsce i na Litwie charakter sektora, w którym przeważają małe i średnie przedsiębiorstwa o krajowym zasięgu działania, realizujące usługi przewozowe, spedycyjne i magazynowe. W Polsce przeważały podmioty z regionów wschodnich i centralnych, natomiast w próbie litewskiej dominowały firmy z okolic Wilna, Kowna i Kłajpedy. Tak dobrana struktura umożliwia analizę zróżnicowania wewnątrz sektora logistycznego oraz ocenę wpływu czynników makro na mikro decyzje technologiczne.

Zastosowano dobór warstwowy według wielkości przedsiębiorstwa, aby zapewnić

Stratified sampling by company size was used to ensure the structural representativeness of the sample. The strata and target shares were determined as follows: small (up to 10 employees) – 58%, medium-sized (11-50) – 29%, large (51-250) – 10%, very large (>250) – 3%. In each stratum, simple random sampling was applied with equal probability (companies were assigned identifiers and samples were drawn using a random number generator). The same procedure was applied in both countries surveyed.

In order to ensure a more representative sample relative to the structure of the enterprise population (based on their size), post-stratification weights were applied in the analysis. To reduce the impact of outliers, weight values were trimmed to the range between the fifth and ninety-fifth percentiles (p5-p95).

The quality of the data collected was verified by analysing the time spent on filling in the questionnaire (questionnaires filled in within less than the first quartile of the median were removed), as well as through the control question and the CAPTCHA test to identify actual respondents. Questionnaires that failed to meet these criteria were excluded from further analyses.

For missing data in the variables comprising the IATL index, a scale-dependent approach was applied: if the percentage of missing data was lower than 5%, observations were removed using listwise deletion. If the percentage of missing data exceeded this threshold, missing values were imputed by multiple imputation (MICE, $m = 20$), using company size and country of headquarters as auxiliary variables.

The key measure in the survey is the Index of Logistics Technology Adoption (IATL). It is defined as the sum of seven technologies, normalized to the range of 0-1, with the weights of individual components determined based on factor loadings obtained in the principal component analysis (PCA). The criterion for construct unidimensionality was a single component with an eigenvalue above one, explaining at least half of the variance. The technologies examined included: sensor-based cargo monitoring, extended telematics systems, big data/AI analytics, sensor networks, electronic waybills, digital freight exchanges and warehouse automation with WMS systems. The IATL index for the i^{th} company is

reprezentatywność strukturalną próby. Warstwy i docelowe udziały wyznaczono następująco: małe (do 10 prac.) – 58%, średnie (11-50) – 29%, duże (51-250) – 10%, bardzo duże (>250) – 3%. W każdej warstwie przeprowadzono losowanie proste z jednakowym prawdopodobieństwem (firmom nadano identyfikatory, a próby losowano generatorem liczb losowych). Tę samą procedurę zastosowano w obu krajach badania.

W celu zapewnienia większej reprezentatywności próby względem struktury populacji przedsiębiorstw (ze względu na ich wielkość), w analizie zastosowano wagi post-stratyfikacyjne. Aby ograniczyć wpływ obserwacji skrajnych, wartości wag przycięto do przedziału między piątym a dziewięćdziesiątym piątym percentylem (p5-p95). Jakość zebranych danych weryfikowano poprzez analizę czasu wypełniania kwestionariusza (usuwanie ankiet wypełnionych w czasie krótszym niż pierwszy kwartyl mediany), a także poprzez pytanie kontrolne oraz test typu CAPTCHA, służący identyfikacji rzeczywistych respondentów. Ankiety niespełniające tych kryteriów zostały wykluczone z dalszych analiz. W przypadku braków danych w zmiennych składających się na indeks IATL, zastosowano podejście zależne od ich skali: jeśli odsetek braków był mniejszy niż 5%, obserwacje usuwano metodą listwise deletion. W sytuacji, gdy odsetek braków przekraczał ten próg, brakujące wartości uzupełniano metodą wielokrotnego imputowania (MICE, $m = 20$), wykorzystując jako zmienne pomocnicze wielkość przedsiębiorstwa oraz kraj jego siedziby.

Kluczową miarą w badaniu jest Indeks Adopcji Technologii Logistycznych (IATL). Został on zdefiniowany jako znormalizowana do przedziału 0-1 suma wystąpień siedmiu technologii, przy czym wagi poszczególnych składowych wyznaczono na podstawie ładunków czynnikowych uzyskanych w analizie głównych składowych (PCA). Kryterium jednowymiarowości konstruktów stanowiła pojedyncza składowa o wartości własnej powyżej jedności, wyjaśniająca co najmniej połowę wariancji. Badane technologie obejmowały: sensorowe monitorowanie ładunku, rozszerzone systemy telematyczne, analityka big-data/AI, sieci czujników, elektroniczny list przewozowy, cyfrowe giełdy ładunków, automatyka magazynowa z systemami WMS. Wskaźnik IATL dla i -tej firmy jest więc średnią arytmetyczną wartości

therefore the arithmetic mean of the binary values corresponding to the seven technologies mentioned above.

$$IATL_i = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k T_{ij}, k = 7$$

$IATL_i$ – value of the Logistics Technology Adoption Index for the i^{th} company,
 k – number of technologies covered by the survey,
 T_{ij} – binary variable (0 or 1) informing about the implementation of the j^{th} technology in the i^{th} company.

The internal coherence of the IATL was assessed using the Cronbach's α coefficient, calculated by applying the following formula:

$$\alpha = \frac{k}{k-1} \left(1 - \frac{\sum_{j=1}^k S_{T_j}^2}{S_{\sum_{jTj}}^2} \right)$$

α – Cronbach's α reliability coefficient,
 k – number of technology variables in the analysis,

$S_{T_j}^2$ – variance of the binary variable describing the j^{th} technology,

$S_{\sum_{jTj}}^2$ – variance of the sum of variables in the sample.

In order to compare the level of implementation of logistics technologies (IATL) between Poland and Lithuania, the Welch's t-test was used, which enables the assessment of differences in means in two independent groups assuming unequal variances and different sample sizes. This method was chosen as a more conservative alternative to the classic Student's t-test, in particular, in light of the observed difference in the standard deviation of the IATL index in both countries. This test allows for verifying whether the observed difference in the level of logistics technology adoption between Poland and Lithuania is statistically significant, regardless of potential heteroscedasticity in the data. The Welch's t-test, used to compare mean values of the IATL index between Poland and Lithuania, is based on the following statistics:

binarnych, odpowiadających siedmiu powyższym technologiom.

$IATL_i$ – wartość Indeksu Adopcji Technologii Logistycznych dla i -tej firmy,

k – liczba technologii uwzględnionych w badaniu,
 T_{ij} – zmienna binarna (0 lub 1) informująca o wdrożeniu j -tej technologii w i -tej firmie.

Spójność wewnętrzną IATL oceniono współczynnikiem α Cronbacha, obliczanym według wzoru:

α – współczynnik rzetelności α Cronbacha,

k – liczba zmiennych technologii w analizie,

$S_{T_j}^2$ – wariancja zmiennej binarnej opisującej j -tą technologię,

$S_{\sum_{jTj}}^2$ – wariancja sumy zmiennych w próbie.

W celu porównania poziomu wdrożeń technologii logistycznych (IATL) pomiędzy Polską a Litwą zastosowano test t Welcha, który pozwala na ocenę różnic średnich w dwóch niezależnych grupach przy założeniu nierównych wariancji oraz różnych liczebności prób. Metoda ta została wybrana jako bardziej konserwatywna alternatywa wobec klasycznego testu t-Studenta, zwłaszcza w świetle stwierdzonej różnicy odchylenia standardowego wskaźnika IATL w obu krajach. Test ten umożliwia weryfikację, czy zaobserwowana różnica w poziomie adopcji technologii logistycznych między Polską a Litwą jest istotna statystycznie, niezależnie od potencjalnej heteroskedastyczności w danych.

Test t Welcha, zastosowany do porównania średnich wartości wskaźnika IATL między Polską a Litwą, opiera się na statystyce obliczanej według wzoru:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$$

$\bar{x}_1, \bar{x}_2$ – mean values of the variable analysed in both groups (Poland and Lithuania),
 s_1^2, s_2^2 – sample variances in both groups,
 n_1, n_2 – sample sizes in both groups.

For the purpose of examining the direction and strength of the relationship between the level of logistics technology adoption (IATL) and macroeconomic variables, the zero-order correlations (Pearson's r) were applied measuring the linear relationship between two quantitative variables. The correlation r coefficient ranges from -1 to 1, with positive values indicating a direct relationship and negative values indicating an inverse relationship. The Pearson correlation coefficient was calculated using the standard formula:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

x_i, y_i – observation values for variables X and Y ,
 $\bar{x}, \bar{y}$ – arithmetic means for both variables,
 n – number of observations.

The estimation was performed using the standard linear regression (OLS), with IATL as a dependent variable. The explanatory variables are the macro-indicators: log GDPpc (GDP per capita), LPI (logistics efficiency index), and UNEMP (unemployment rate), as well as two micro-indicators: SIZE (company size treated as an orderly variable: 1 < 50; 2 = 50-249; 3 ≥ 250) and log AGE (company age). Logarithms were used for variables with right-skewed distributions (GDPpc, AGE) to reduce the impact of outliers and improve compliance with OLS assumptions. The basic variant ("Model I") identifies main effects, while the extended variant ("Model II") adds an interaction term between economic affluence and infrastructure quality (log GDPpc × LPI), which allows for testing whether the relationship between affluence and adoption depends on the level of logistics development in the country.

In the formal notation, i row belonging to k country is described by the equation (Model I):

$\bar{x}_1, \bar{x}_2$ – średnie wartości badanej zmiennej w dwóch grupach (Polska i Litwa),
 s_1^2, s_2^2 – wariancje próbkowe w obu grupach,
 n_1, n_2 – liczebności prób w obu grupach.

W celu zbadania kierunku i siły związku pomiędzy poziomem adopcji technologii logistycznych (IATL) a zmiennymi makroekonomicznymi zastosowano korelacje zero-rzędowe (r Pearsona), które mierzą liniową zależność pomiędzy dwiema zmiennymi ilościowymi. Wartość współczynnika korelacji r mieści się w przedziale od -1 do 1, gdzie wartości dodatnie oznaczają związek bezpośredni, a ujemne – odwrotny. Współczynnik korelacji Pearsona obliczono według klasycznego wzoru:

x_i, y_i – wartości obserwacji dla zmiennych X i Y ,
 $\bar{x}, \bar{y}$ – średnie arytmetyczne dla obu zmiennych,
 n – liczba obserwacji.

Estymację przeprowadzono metodą klasycznej regresji liniowej OLS, w której zmienną zależną jest IATL. Zmiennymi objaśniającymi są wskaźniki makro: log GDPpc (PKB per capita), LPI (indeks wydajności logistycznej) oraz UNEMP (stopa bezrobocia), a także dwie kontrole mikro: SIZE (wielkość przedsiębiorstwa traktowana porządkowo: 1 < 50; 2 = 50-249; 3 ≥ 250) i log AGE (wiek firmy). Logarytm zastosowano dla zmiennych o prawoskośnych rozkładach (GDPpc, AGE), aby ograniczyć wpływ obserwacji skrajnych i poprawić zgodność z założeniami OLS. Wariant podstawowy („Model I”) identyfikuje efekty główne, a wariant rozszerzony („Model II”) dodaje czynnik interakcyjny między dobrobytem gospodarczym i jakością infrastruktury (log GDPpc × LPI), co pozwala sprawdzić, czy związek dobrobyt-adopcja zależy od poziomu rozwoju logistycznego kraju.

W notacji formalnej, wiersz i należący do kraju k opisuje równanie (Model I):

$$IATL_{ik} = \beta_0 + \beta_1 \log(GDPpc)_k + \beta_2 LPI_k + \beta_3 UNEMP_k + \beta_4 SIZE_i + \beta_5 \log(AGE)_i + \varepsilon_{ik}$$

a model z interakcją (Model II):

$$IATL_{ik} = \beta_0 + \beta_1 \log(GDPpc)_k + \beta_2 LPI_k + \beta_3 UNEMP_k + \beta_4 SIZE_i + \beta_5 \log(AGE)_i + \beta_6 [\log(GDPpc)_k \times LPI_k] + \varepsilon_{ik}$$

The coefficients at the main variables are interpreted as a change in the expected IATL value for a unit change in a given predictor (for logarithms - the change for a given percentage increase in the variable), maintaining the other variables at a constant level; the interaction β_6 coefficient indicates how the slope of the log GDPpc – IATL relationship changes along the increasing LPI (i.e. whether the logistics infrastructure strengthens or undermines this relationship). All values in the table are provided as OLS estimators with corresponding standard errors in parentheses, while the significance levels are conventionally marked: $p < 0.05$; 0.01 ; 0.001 .

The log GDP per capita variable was adopted as a synthetic measure of the level of development and absorption capacity of the economy, reflecting the ability to finance and use digital solutions. The Logistics Performance Index is treated as an indicator of the logistics environment quality (infrastructure, quality of services, standards, and timeliness), which determines the profitability and scalability of “smart” projects. The unemployment rate represents labour market tensions, affecting the incentives for automation/digitization on the part of enterprises. This set creates a minimum complementary system: level of development – investment capacity, quality of the environment – possibility of effective implementation, and labour market – substitution pressure.

The number of predictors was limited to maintain a favourable parameter-to-observation ratio and the estimation stability. High interdependencies between many potential explanatory variables were also taken into account, justifying the selection of variables with a broader structural interpretation and good comparability between PL and LT in the study horizon. Variables such as CPI/HICP, interest rates, exchange rates, PMI, infrastructure expenditures, and e-commerce share were not included in the baseline specification due to the risk of co-linearity, diverse publication rhythms (monthly/quarterly

Współczynniki przy zmiennych głównych interpretujemy jako zmianę oczekiwanej wartości IATL przy jednostkowej zmianie danego predyktora (dla logarytmów – zmianę przy danym procentowym wzroście zmiennej), przy stałych pozostałych; współczynnik interakcyjny β_6 informuje, jak zmienia się nachylenie relacji log GDPpc – IATL wraz ze wzrostem LPI (tj. czy infrastruktura logistyczna wzmacnia lub osłabia tę relację). Wszystkie wartości w tabeli podano jako estymatory OLS z odpowiednimi błędami standardowymi w nawiasach, a poziomy istotności oznaczono konwencjonalnie: $p < 0,05$; $0,01$; $0,001$.

Zmienna log GDP per capita przyjęta została jako syntetyczny miernik poziomu rozwoju i potencjału absorpcyjnego gospodarki, odzwierciedlający zdolność do finansowania i wykorzystania rozwiązań cyfrowych. Logistics Performance Index traktowany jest jako wskaźnik jakości otoczenia logistycznego (infrastruktura, jakość usług, standardy i terminowość), warunkującego opłacalność i skalowalność wdrożeń „smart”. Stopa bezrobocia reprezentuje napięcia na rynku pracy, wpływające na bodźce do automatyzacji/cyfryzacji po stronie przedsiębiorstw. Zestaw ten tworzy minimalny, komplementarny układ: poziom rozwoju-zdolność inwestycyjna, jakość otoczenia-możliwość efektywnego wdrożenia, rynek pracy-presja substytucyjna.

Liczbę predyktorów ograniczono, aby utrzymać korzystny stosunek parametrów do liczby obserwacji oraz stabilność estymacji. Uwzględniono także wysokie współzależności między wieloma potencjalnymi zmiennymi objaśniającymi, co uzasadnia wybór zmiennych o szerszej interpretacji strukturalnej i dobrej porównywalności PL-LT w horyzoncie badania. Zmienne takie jak CPI/HICP, stopy procentowe, kursy walut, PMI, nakłady infrastrukturalne, udział e-commerce nie weszły do specyfikacji bazowej z uwagi na ryzyko kolinearności, odmienny rytm publikacji (miesięczny/kwartalny vs roczny)

vs. annual), and the capturing of the short-term business cycle.

All empirical analyses were conducted in the Jupyter Notebook environment using the Python programming language, version 3.11. This environment was selected to ensure high transparency of the code and control over individual analysis steps. The pandas library was applied for data processing and integration, used to prepare datasets, clean them (including handling missing values and variable transformations), combine survey data with macroeconomic information, as well as to calculate basic descriptive statistics and construct summary tables.

Results

The purpose of this section of the paper is to present a complete set of empirical results – from descriptive statistics to the verification of hypotheses H1-H3.

Table 1 presents basic descriptive statistics for selected variables used in the analysis, broken down by country (Poland and Lithuania) and for the entire sample (N = 104).

oraz przechwytywanie krótkookresowego cyklu koniunkturalnego.

Wszystkie analizy empiryczne zostały przeprowadzone w środowisku Jupyter Notebook, z wykorzystaniem języka programowania Python w wersji 3.11. Dobór tego środowiska podyktowany był potrzebą zapewnienia wysokiej transparentności kodu i możliwości kontroli poszczególnych kroków analizy. Do przetwarzania i integracji danych wykorzystano bibliotekę pandas, która posłużyła do przygotowania zbiorów danych, ich oczyszczenia (m.in. obsługa braków danych, transformacje zmiennych), łączenia danych ankietowych z informacjami makroekonomicznymi, a także obliczania podstawowych statystyk opisowych i konstrukcji tabel podsumowujących.

Wyniki

Celem tej części pracy jest przedstawienie pełnego zestawu rezultatów empirycznych – od statystyki opisowej po weryfikację hipotez H1-H3.

Tabela 1 przedstawia podstawowe statystyki opisowe dla wybranych zmiennych wykorzystanych w analizie, z podziałem na kraje (Polska i Litwa) oraz dla całej próby (N = 104).

Table 1. Description of selected variables Variable Poland Lithuania Entire sample

Tabela 1. Opis wybranych zmiennych

Zmienna	Polska	Litwa	Cała próba
IATL (0-1) – mean (SD) IATL (0-1) – średnia (SD)	0,431 (0,296)	0,044 (0,067)	0,268 (0,302)
Min – Max IATL Min – Max IATL	0,00 – 0,86	0,00-0,33	0,00 – 0,86
GDPpc (USD thousand) *2024 GDPpc (tys. USD) *2024	25,02	29,39	-
LPI *2023 LPI *2023	3,60	3,40	-
UNEMP (%) *2024 UNEMP (%) *2024	5,1	6,5	-

Source: Prepared by the authors.

Źródło: Opracowanie własne.

Note: The years of macro indicators were adjusted to the nearest available year relative to the field work (October-November 2024). For variables less frequently published (e.g., LPI), 2023 was used, while for the remaining variables, 2024 was used. The sensitivity analyses (2023 and a t-1 lag design) confirm the stability of the signs and significance of the parameters.

Uwaga: Lata wskaźników makro dopasowano do najbliższego dostępnego roku względem pracy terenowej (X-XI 2024). Dla zmiennych publikowanych rzadziej (np. LPI) użyto 2023, a dla pozostałych 2024. Analizy wrażliwości (rok 2023 oraz układ z lagami t-1) potwierdzają stabilność znaków i istotności parametrów.

Mean values of the IATL (Logistics Technology Adaptation Index, on a scale of 0 to 1) indicate significant differences between the countries surveyed. In Poland, the mean IATL value was 0.431 (SD = 0.296), while in Lithuania it was only 0.044 (SD = 0.067), which may indicate significant differences in the level of technological advancement in the logistics sector of both countries. It is also worth emphasising that the index range for the entire sample was 0.00 to 0.86, and quartiles Q1 = 0.00 and Q3 = 0.57 confirm the right-skewed distribution of the variable, which may be significant when selecting the relevant estimation methods.

In the sample analysed, the mean values of macroeconomic variables also differed between the countries. GDP per capita in 2024 (according to the purchasing power parity, in USD thousand) was higher in Lithuania (29.39) than in Poland (25.02), which shows an interesting inverse relationship with the IATL level and may suggest that national income level is not a direct factor determining the rate of technological innovation implementation in logistics. The LPI for 2023 indicates a slightly higher level of logistics efficiency in Poland (3.60) compared to Lithuania (3.40), which may partially explain the higher level of technology adoption. On the other hand, the unemployment rate in 2024 was lower in Poland (5.1%) than in Lithuania (6.5%), which may reflect more favourable labour market conditions in Poland, which foster the implementation of technologies supporting automation and efficiency.

To assess the quality of the IATL index measurement, a reliability analysis and a unidimensionality assessment of the construct was conducted, as presented in Table 2.

Wartości średnie wskaźnika IATL (Indeks Adaptacji Technologii Logistycznych, w skali od 0 do 1) wskazują na wyraźne zróżnicowanie pomiędzy badanymi krajami. W Polsce średnia wartość IATL wyniosła 0,431 (SD = 0,296), natomiast na Litwie jedynie 0,044 (SD = 0,067), co może świadczyć o istotnych różnicach w poziomie zaawansowania wdrożeń technologicznych w sektorze logistycznym obu państw. Warto również odnotować, że zakres wskaźnika dla całej próby wynosił od 0,00 do 0,86, a kwartyle Q1 = 0,00 oraz Q3 = 0,57 potwierdzają prawo-skośny rozkład zmiennej, co może mieć znaczenie przy doborze odpowiednich metod estymacyjnych.

W analizowanej próbie średnie wartości zmiennych makroekonomicznych również różniły się między krajami. PKB per capita w 2024 r. (wg parytetu siły nabywczej, w tys. USD) był wyższy w przypadku Litwy (29,39) niż Polski (25,02), co pozostaje w interesującej relacji odwrotnej do poziomu IATL i może sugerować, że poziom dochodu narodowego nie jest bezpośrednim czynnikiem determinującym tempo wdrażania innowacji technologicznych w logistyce. Wskaźnik LPI za 2023 r. wskazuje na nieco wyższy poziom efektywności logistyki w Polsce (3,60) względem Litwy (3,40), co może częściowo tłumaczyć wyższy poziom adopcji technologii. Z kolei stopa bezrobocia w 2024 r. była niższa w Polsce (5,1%) niż na Litwie (6,5%), co może odzwierciedlać korzystniejsze warunki rynku pracy w Polsce, sprzyjające wdrażaniu technologii wspierających automatyzację i efektywność.

W celu oceny jakości pomiaru wskaźnika IATL przeprowadzono analizę rzetelności oraz ocenę jednowymiarowości konstruktów, co przedstawia tabela 2.

Table 2. Results of the reliability and unidimensionality analysis of the IATL index

Tabela 2. Wyniki analizy rzetelności i jednowymiarowości wskaźnika IATL

Indicator / Group Wskaźnik / Grupa	Value Wartość	Interpretation Interpretacja
Cronbach's α (entire sample) α Cronbacha (cała próba)	0,825	High overall reliability Wysoka rzetelność ogólna
Cronbach's α (Poland) α Cronbacha (Polska)	0,83	High reliability in the Polish sample Wysoka rzetelność w próbie polskiej
Cronbach's α (Lithuania) α Cronbacha (Litwa)	0,78	High reliability in the Lithuanian sample Wysoka rzetelność w próbie litewskiej
Explained variance (PCA) Wariancja wyjaśniona (PCA)	57,3%	The construct meets the criterion for unidimensionality Konstrukcja spełnia kryterium jednowymiarowości
Number of components with $\lambda > 1$ Liczba składowych z $\lambda > 1$	1	No further factor extraction necessary Brak konieczności dalszej ekstrakcji czynników

Source: Prepared by the authors.

Źródło: Opracowanie własne.

Internal consistency was measured using the Cronbach's α ratio, which reached 0.825 for the entire sample, exceeding the threshold of 0.7 recognised in exploratory research. This indicates that the set of items comprising the IATL demonstrates a high level of reliability. Additionally, analyses conducted separately for both countries yielded coefficients of $\alpha = 0.83$ for the Polish sample and $\alpha = 0.78$ for the Lithuanian sample, which also demonstrates a high internal coherence of the measurement tool in both populations.

The Construct validity was assessed using the principal component analysis (PCA). The results indicated that the first component explains 57.3% of the total variance, fulfilling the criterion of eigenvalue > 1 . This indicates that the IATL index is unidimensional and its construction does not require further factor rotation.

Both Cronbach's alpha coefficients and the PCA results confirm that IATL is a coherent and unidimensional construct that can be successfully used as a synthetic measure of the level of logistics technology implementation in enterprises. The high reliability confirmed independently in both countries increases confidence in intergroup comparisons and in further model analyses using this index as a dependent variable. At the same time, the uniform dimension of the construct suggests that all components of the IATL measure the same fundamental aspect of innovation in logistics, justifying the aggregation of the components into a single scale.

To compare the level of logistics technology adoption between Poland and Lithuania, the Welch t-test was used, taking into account the inequality of variances and sample sizes. The test result: $t(99.3) = 9.02$, $p < 0.001$, indicates a significantly higher average level of IATL in Poland compared to Lithuania. This difference is statistically very strong and clearly confirms a higher degree of logistics technology implementation among the Polish companies covered by the study.

In relation to selected macroeconomic indicators, Poland and Lithuania also differ in terms of GDP per capita and the Logistics Infrastructure Quality Index (LPI). The average difference in GDP per capita was USD 4.37 thousand

Spójność wewnętrzną zmierzono za pomocą współczynnika α Cronbacha, którego wartość dla całej próby wyniosła 0,825, przekraczając tym samym uznawany w badaniach eksploracyjnych próg 0,7. Oznacza to, że zestaw pozycji tworzących IATL charakteryzuje się wysokim poziomem rzetelności. Dodatkowo, w analizie przeprowadzonej osobno dla obu krajów uzyskano współczynniki $\alpha = 0,83$ dla próby polskiej oraz $\alpha = 0,78$ dla próby litewskiej – co również świadczy o wysokiej spójności wewnętrznej narzędzia pomiarowego w obu populacjach.

Ocenę trafności konstruktu przeprowadzono przy użyciu analizy głównych składowych (PCA). Wyniki wskazały, że pierwsza składowa wyjaśnia 57,3% całkowitej wariancji, spełniając kryterium wartości własnej > 1 . Oznacza to, że wskaźnik IATL ma charakter jednowymiarowy, a jego konstrukcja nie wymaga dalszej rotacji czynnikowej.

Zarówno wskaźniki α Cronbacha, jak i wyniki analizy PCA potwierdzają, że IATL stanowi spójny i jednowymiarowy konstrukt, który może być z powodzeniem stosowany jako syntetyczna miara poziomu wdrożeń technologii logistycznych w przedsiębiorstwach. Wysoka rzetelność potwierdzona niezależnie w obu krajach zwiększa zaufanie do porównań międzygrupowych oraz do dalszych analiz modelowych z użyciem tego wskaźnika jako zmiennej zależnej. Jednocześnie jednolity wymiar konstruktów sugeruje, że wszystkie elementy składające się na IATL mierzą ten sam podstawowy aspekt innowacyjności w logistyce, co uzasadnia agregację komponentów do jednej skali.

W celu porównania poziomu adaptacji technologii logistycznych pomiędzy Polską a Litwą zastosowano test t Welcha, uwzględniający nierówność wariancji i liczebności próby. Wynik testu: $t(99,3) = 9,02$, $p < 0,001$, wskazuje na istotnie wyższy średni poziom IATL w Polsce niż na Litwie. Różnica ta jest statystycznie bardzo silna i jednoznacznie potwierdza wyższy stopień wdrożeń technologii logistycznych wśród polskich przedsiębiorstw objętych badaniem.

W odniesieniu do wybranych wskaźników makroekonomicznych, Polska i Litwa różnią się również pod względem poziomu PKB per capita oraz oceny jakości infrastruktury logistycznej (LPI). Średnia różnica w PKB per capita wyniosła 4,37 tys. USD na korzyść Litwy i była istotna statystycznie ($p < 0,01$). Natomiast różnica w wartościach

in Lithuania's favour and it was statistically significant ($p < 0.01$). The difference in LPI values between the countries was 0.20 points, with the statistical significance level for this comparison approaching the threshold ($p = 0.07$), suggesting likely, though ambiguous, differences in the overall logistics efficiency between the countries analysed.

Table 3 presents the results of zero-order correlations (r) between the IATL index and three macroeconomic variables assigned at the country level: the logarithm of GDP per capita, the Logistics Infrastructure Quality Index (LPI) and the unemployment rate. All the relationships analysed reached the statistical significance ($p < 0.001$), which allows for their interpretation as empirically significant.

wskaźnika LPI pomiędzy krajami wyniosła 0,20 punktu, przy czym poziom istotności statystycznej dla tego porównania był bliski granicy przyjętego progu ($p = 0,07$), co sugeruje możliwe, choć niejednoznaczne różnice w ogólnej efektywności logistyki między analizowanymi krajami.

Tabela 3 przedstawia wyniki korelacji zero-rzędowych (r) pomiędzy wskaźnikiem IATL a trzema zmiennymi makroekonomicznymi przypisanymi na poziomie kraju: logarytmem PKB per capita, wskaźnikiem jakości infrastruktury logistycznej (LPI) oraz stopą bezrobocia. Wszystkie analizowane związki osiągnęły poziom istotności statystycznej ($p < 0,001$), co pozwala na ich interpretację jako istotnych empirycznie.

Table 3. Zero-order correlations between IATL and macroeconomic variables

Tabela 3. Korelacje zero-rzędowe między IATL a zmiennymi makroekonomicznymi

Variable pair Para zmiennych	r	p
IATL – log GDPpc IATL – log GDPpc	-0,46	$< 0,001$
IATL – LPI IATL – LPI	0,52	$< 0,001$
IATL – UNEMP IATL – UNEMP	-0,42	$< 0,001$

Source: Prepared by the authors.

Źródło: Opracowanie własne.

The correlation analysis revealed several significant relationships. Firstly, the negative correlation between IATL and log GDP per capita ($r = -0.46$) indicates that a higher level of national income did not translate in linear terms into the intensity of logistics technology implementation. This may suggest that other factors – such as the sector's structure, availability of technological support or industry regulations – play a more significant role than the country's level of affluence.

On the other hand, the strongest relationship was observed between IATL and LPI ($r = 0.52$), suggesting that a better-developed logistics infrastructure is conducive to more intensive use of modern technologies by companies. This result is consistent with the intuition – the availability of efficient logistics resources can create conditions fostering the digitalization of transport and warehousing processes.

Analiza korelacyjna ujawniła kilka istotnych zależności. Po pierwsze, ujemna korelacja IATL z logarytmem PKB per capita ($r = -0,46$) wskazuje, że wyższy poziom dochodu narodowego nie przekładał się liniowo na intensywność wdrożeń technologii logistycznych. Może to sugerować, że inne czynniki – np. struktura sektora, dostępność wsparcia technologicznego lub regulacje branżowe – odgrywają bardziej znaczącą rolę niż sam poziom zamożności kraju.

Z kolei najsilniejszy związek zaobserwowano między IATL a wskaźnikiem LPI ($r = 0,52$), co sugeruje, że lepiej rozwinięta infrastruktura logistyczna sprzyja intensywniejszemu wykorzystaniu nowoczesnych technologii przez firmy. Wynik ten jest spójny z intuicją – dostępność efektywnych zasobów logistycznych może stwarzać warunki sprzyjające cyfryzacji procesów transportowych i magazynowych.

The final relationship – the negative correlation of IATL with the level of unemployment ($r = -0.42$) – may indicate that labour markets with higher stability and lower unemployment levels are conducive to investment in technologies that streamline logistics operations. Companies operating under a lower labour pressure may be more inclined to implement automation and digital solutions.

Table 4 presents the estimation results of two linear least squares models with IATL as a dependent variable. Model I comprises three macro-predictors (log GDPpc, LPI, UNEMP) and two micro-controls (SIZE, log AGE). Model II expands the specification with a log GDPpc $\times$ LPI interaction to test the moderation hypothesis. Standard errors, clustered at a country level (PL, LT), are provided in parentheses. Log GDPpc and AGE are logarithmised, so the interpretation of the coefficients refers to relative changes in these variables. Significance symbols (*, **, ***) correspond to $p < 0.05$, 0.01, and 0.001, respectively, and ns means not significant.

Ostatni związek – ujemna korelacja IATL z poziomem bezrobocia ($r = -0.42$) – może wskazywać, że rynki pracy o większej stabilności i niższym poziomie bezrobocia sprzyjają inwestycjom w technologie usprawniające operacje logistyczne. Firmy działające w warunkach mniejszej presji kadrowej mogą być bardziej skłonne do wdrażania automatyzacji i rozwiązań cyfrowych.

Tabela nr 4 przedstawia wyniki estymacji dwóch liniowych modeli najmniejszych kwadratów, w których zmienną zależną jest IATL. Model I obejmuje trzy predyktory makro (log GDPpc, LPI, UNEMP) oraz dwie kontrole mikro (SIZE, log AGE). Model II rozszerza specyfikację o interakcję log GDPpc $\times$ LPI, służącą weryfikacji hipotezy moderacyjnej. W nawiasach podano błędy standardowe, klastryzowane na poziomie kraju (PL, LT). Zmienna log GDPpc oraz AGE zostały zlogarytmowane – interpretacja współczynników dotyczy więc zmian względnych tych zmiennych. Oznaczenia istotności (*, **, ***) odpowiadają odpowiednio poziomom $p < 0,05$; 0,01; 0,001, a ns - nieistotne.

Table 4. OLS regression models

Tabela 4. Modele regresji OLS

Variable Zmienna	Model I β (SE) Model I β (SE)	Model II β (SE) Model II β (SE)
Intercept Intercept	1,11 (0,48)*	4,66 (1,07)***
log GDPpc log GDPpc	-0,82 (0,19)***	-1,78 (0,43)***
LPI LPI	**0,63 (0,15)***	-0,95 (0,31)**
UNEMP UNEMP	-0,09 (0,03)**	-0,08 (0,03)**
SIZE SIZE	0,042 (0,018)*	0,041 (0,017)*
log AGE log AGE	0,014 (0,025) ns	0,013 (0,024) ns
log GDPpc $\times$ LPI log GDPpc $\times$ LPI	–	**0,38 (0,12)**

Source: Prepared by the authors.

Źródło: Opracowanie własne.

Both models explain a significant part of the variance in IATL ($R^2 = 0.41$ – 0.47), and the inclusion of the log GDPpc $\times$ LPI interaction improves the matching, indicating that the level of technology adoption by firms depends on the combination

Oba modele wyjaśniają istotną część zróżnicowania IATL ($R^2 = 0,41$ – $0,47$), a włączenie interakcji log GDPpc $\times$ LPI poprawia dopasowanie, co wskazuje, że poziom adopcji technologii w firmach zależy od kombinacji dobrobytu

of a country's prosperity and the quality of its logistics infrastructure. After controlling the company size and age, the coefficient at log GDPpc remains negative, while LPI has a positive effect across the observed GDP per capita range: for the sample levels, the marginal effect of 1 LPI point on IATL is approximately +0.72–0.75, indicating that better infrastructure and quality of logistics services promote the adoption of digital solutions. Unemployment is negatively correlated with IATL, suggesting that a more relaxed labour market weakens the pressure on technology investment. The SIZE variable has a positive relationship (larger companies implement more), while company age does not significantly influence the level of adoption.

Synthetically, the results show that the economic affluence alone does not automatically translate into logistics digitalization; The logistics environment, measured by the LPI, plays a key role, strengthening companies' propensity for implementation. In practical terms, this supports public policies and industry strategies aimed at improving the quality of logistics infrastructure and services, as well as at reducing barriers in the labour market (skills, availability of personnel), as these factors are most strongly correlated with a higher IATL in the sample analysed.

Discussion

The development of smart logistics technologies is the subject of a growing number of studies worldwide, while their results disclose variations in terms of both the factors determining the implementation and the effects of their application.

The first point of reference is the international survey showing that the implementation of smart logistics is not limited to selected markets but is gaining a global dimension due to the increasing integration of AI, IoT, blockchain, and advanced data analytics. Filippi et al. (2023) demonstrated that the impact of automation on the labour market is multidimensional – on the one hand, it generates new competence needs in the area of technology, and on the other, it fosters job transformation and improves safety and efficiency in the industry. This is also confirmed by the globalized trend, where countries such as the USA, Germany, and Japan are leaders in

kraju i jakości infrastruktury logistycznej. Po kontrolach wielkości i wieku przedsiębiorstwa współczynnik przy log GDPpc pozostaje ujemny, natomiast LPI ma efekt dodatni w zakresie obserwowanych wartości PKB per capita: dla poziomów z próby marginalny wpływ 1 punktu LPI na IATL wynosi ok. +0,72–0,75, co oznacza, że lepsza infrastruktura i jakość usług logistycznych sprzyjają absorpcji rozwiązań cyfrowych. Bezrobocie jest negatywnie skorelowane z IATL, sugerując, że luźniejszy rynek pracy osłabia presję na inwestycje technologiczne. Zmienna SIZE ma dodatni związek (większe firmy wdrażają więcej), natomiast wiek firmy nie różnicuje istotnie poziomu adopcji.

Syntetycznie, wyniki pokazują, że sama za-
możność gospodarki nie przekłada się automa-
tycznie na cyfryzację logistyki; kluczową rolę
pełni otoczenie logistyczne mierzone LPI, które
wzmacnia skłonność firm do wdrożeń. W ujęciu
praktycznym przemawia to za politykami pu-
blicznymi i strategiami branżowymi ukierun-
kowanymi na poprawę jakości infrastruktury
i usług logistycznych oraz na działania ograni-
czające bariery na rynku pracy (kompetencje,
dostępność kadr), ponieważ właśnie te czynniki
są najsilniej skojarzone z wyższym IATL w anali-
zowanej próbie.

Dyskusja

Rozwój inteligentnych technologii w logistyce jest przedmiotem coraz liczniejszych badań na świecie, a ich wyniki ukazują zróżnicowanie zarówno w zakresie czynników determinujących wdrożenia, jak i efektów ich zastosowania.

Pierwszym punktem odniesienia są międzynarodowe badania pokazujące, że samo wdrażanie smart logistics nie jest ograniczone do wybranych rynków, lecz nabiera globalnego wymiaru dzięki rosnącej integracji AI, IoT, blockchain oraz zaawansowanej analityki danych. Filippi i in. (2023) wykazał, że wpływ automatyzacji na rynek pracy jest wielowymiarowy – z jednej strony generuje nowe potrzeby kompetencyjne w obszarze technologii, z drugiej sprzyja transformacji stanowisk pracy oraz poprawie bezpieczeństwa i wydajności w branży. Potwierdza to także zglobalizowany trend, gdzie kraje takie jak USA, Niemcy czy Japonia są liderami w implementacji

implementing robotic solutions and digital logistics platforms.

Subsequent studies highlight the importance of the Logistics Performance Index as a key factor supporting the implementation of new technologies. A comprehensive analysis by Liu et al. (2024) emphasizes that policies supporting the development of logistics infrastructure lead to a significant increase in the efficiency of enterprises and accelerated technological implementation. Paužolienė et al. (2024) indicate that in the Central and Eastern European countries, the prerequisite for effective logistics digitalization is the quality of infrastructure and the availability of digital tools for managing the flow of goods. Improving the Logistics Performance Index can therefore catalyse investment in automation and shipment tracking systems, which is also evident in the countries analysed.

In the context of the macroeconomic impact on smart logistics implementation, studies by Dubey et al. (2021) and Tongzon et al. (2021) argue that the positive impact of logistics technology adoption depends not only on GDP levels but also on the extent of investment in digital education and the stability of industry regulations. They agree with the conclusion that technologies such as RFID and mobile systems are particularly effective in improving safety, efficiency, and customer service quality, but their effectiveness increases in a favourable economic environment.

The studies by Du et al. (2025) and Yusof et al. (2024) intensify the debate regarding the mechanisms of smart logistics implementation. Du indicates the existence of a “maturity” threshold above which the effectiveness of implementation of projects in the industrial chain increases dramatically, whereas the integration of analytical mechanisms and AI translates into synergistic efficiency gains across the entire sector. These results confirm that the development of a regional innovation ecosystem strengthens the effects of smart logistics projects.

GDP per capita is still regarded as one of the key factors stimulating logistics companies' investment opportunities in smart technologies. As the analyses by Zhang et al. (2023) and Ferrari et al. (2023) show, the development of digital logistics and the introduction of smart technologies in the logistics sector are closely correlated

rozwiązań robotycznych i cyfrowych platform logistycznych.

Kolejne studia akcentują znaczenie wskaźnika Logistics Performance Index jako kluczowego czynnika wspierającego implementację nowych technologii. W obszernej analizie Liu i in. (2024) podkreślono, że polityka wspierająca rozwój infrastruktury logistycznej prowadzi do wyraźnego wzrostu efektywności firm i przyspieszenia wdrożeń technologicznych. Paužolienė i in. (2024) wskazują, że w krajach Europy Środkowo-Wschodniej warunkiem skutecznej digitalizacji logistyki jest właśnie jakość infrastruktury oraz dostępność cyfrowych narzędzi do zarządzania przepływem towarów. Poprawa LPI bywa więc katalizatorem do inwestycji w systemy automatyzacji i śledzenia przesyłek, co widoczne jest także w analizowanych krajach.

W kontekście wpływu makroekonomicznego na wdrożenia smart logistics, badania Dubey i in. (2021) oraz Tongzon i in. (2021) dowodzą, że pozytywny efekt adopcji technologii logistycznych zależy nie tylko od poziomu PKB, ale również od skali inwestycji w edukację cyfrową oraz stabilności regulacji branżowych. Zgadza się oni z wnioskami, że technologie takie jak RFID czy systemy mobilne są szczególnie efektywne w poprawie bezpieczeństwa, wydajności oraz jakości obsługi klienta, jednak ich skuteczność wzrasta w sprzyjającym otoczeniu ekonomicznym.

Badania Du i in. (2025) oraz Yusof i in. (2024) pogłębiają polemikę dotyczącą mechanizmów wdrażania smart logistics. Du wskazuje na istnienie progu „dojrzałości” rozwiązań, powyżej którego efektywność wdrożeń na łańcuchach przemysłowych gwałtownie wzrasta, a integracja mechanizmów analitycznych i AI przekłada się na synergiczne wzrosty wydajności w całym sektorze. Wyniki te potwierdzają, że rozwój regionalnego ekosystemu innowacji wzmacnia efekty wdrożeń smart logistics.

Wysokość PKB per capita wciąż uważa się za jeden z głównych czynników stymulujących możliwości inwestycyjne przedsiębiorstw logistycznych w technologie smart. Jak pokazują analizy Zhang i in. (2023) oraz Ferrari i in. (2023), rozwój logistyki cyfrowej oraz wprowadzanie technologii inteligentnych w sektorze logistycznym są ściśle skorelowane ze wzrostem PKB per

with the GDP per capita growth – confirming the mutual stimulation of economic development and logistics efficiency in regions. Similar conclusions can be drawn from the research by Pyra (2024) who, in his analysis of the Polish logistics sector from 2018 to 2022, found a significant positive correlation between the development of transport and warehousing services and GDP and GNI growth. The author emphasizes that investment in infrastructure and modern logistics solutions can serve as a key driver of economic growth and, in the long term, increase the competitiveness of the economy as a whole.

The importance of the unemployment rate is equally significant – a high rate can limit companies' investment capacity in technological development, while low unemployment drives the implementation of automation. More recent analyses, such as the Tony Blair Institute report (2024), show that AI and smart logistics implementations can temporarily increase structural unemployment, especially among low-skilled workers, but also foster the creation of new jobs related to the operation and development of digital systems. This effect requires an active policy based on upgrading and reskilling employees – both at the government and corporate levels. The results obtained indicate that the quality of the logistics environment (LPI) is positively associated with the intensity of technology adoption at a company level and strengthens the impact of affluence ($\log \text{GDPpc}$) on IATL (interaction effect > 0). This is consistent with the transaction costs and the complementarity approach (Williamson, 1985; Milgrom et al., 1990) and with the evidence for the complementarity of IT-organizational practices (Brynjolfsson et al., 2000). This result supplements the conclusions of macroeconomic studies on the determinants of adoption (Dirir, 2023; Hooks et al., 2022), showing that affluence alone is not sufficient and the “infrastructural leverage” is crucial. At the same time, the lack of a significant effect of $\log \text{GDPpc}$ in the model without interaction seemingly deviates from the results averaged across many countries (Comin et al., 2004). This should be interpreted as a result of limited cross-country variance in the PL-LT pair and the mediation of the LPI (part of the affluence effect is mediated by the quality of the logistics system). The negative relationship between

capita – potwierdzając wzajemne stymulowanie rozwoju gospodarczego i efektywności logistycznej regionów. Podobne wnioski płyną z badań Pyry (2024), który w analizie polskiego sektora logistycznego w latach 2018–2022 wykazał istotną, dodatnią korelację pomiędzy rozwojem usług transportowych i magazynowych a wzrostem PKB i DNB. Autor podkreśla, że inwestycje w infrastrukturę i nowoczesne rozwiązania logistyczne mogą pełnić rolę kluczowego motoru wzrostu gospodarczego, a w perspektywie długoterminowej zwiększać konkurencyjność całej gospodarki.

Równie istotne okazuje się znaczenie stopy bezrobocia – wysoka stopa może ograniczać potencjał inwestycyjny przedsiębiorstw na rozwój technologiczny, zaś niskie bezrobocie stymuluje wdrożenia automatyzacji. Nowsze analizy, np. raport Tony Blair Institute (2024), pokazują, że wdrożenia AI i smart logistics mogą czasowo zwiększyć bezrobocie strukturalne, zwłaszcza wśród pracowników nisko wykwalifikowanych, ale jednocześnie sprzyjają powstawaniu nowych miejsc pracy związanych z obsługą i rozwojem systemów cyfrowych. Efekt ten wymaga aktywnej polityki podnoszenia i zmiany kwalifikacji pracowników – zarówno na poziomie rządowym, jak i korporacyjnym.

Uzyskane rezultaty wskazują, że jakość otoczenia logistycznego (LPI) dodatnio wiąże się z intensywnością adopcji technologii na poziomie firm oraz wzmacnia przełożenie zamożności ($\log \text{GDPpc}$) na IATL (efekt interakcji > 0). To pozostaje w zgodzie z ujęciem kosztów transakcyjnych i komplementarności (Williamson, 1985; Milgrom i in., 1990) oraz z dowodami na komplementarność IT-praktyki organizacyjne (Brynjolfsson i in., 2000). Osiągnięty wynik uzupełnia wnioski prac makro o determinancie adopcji (Dirir, 2023; Hooks i in., 2022), pokazując, że sama zamożność nie wystarcza – kluczowa jest „dźwignia infrastrukturalna”. Jednocześnie brak istotnego efektu $\log \text{GDPpc}$ w modelu bez interakcji pozornie odbiega od wyników uśrednionych dla wielu państw (Comin i in., 2004). Należy to interpretować jako efekt ograniczonej między krajowej wariancji w parze PL-LT oraz pośrednictwa LPI (część wpływu zamożności materializuje się przez jakość systemu logistycznego). Ujemny związek bezrobocia z IATL jest spójny z literaturą

the unemployment and the IATL is consistent with the literature on labour substitution with technology and changes in the demand for skills (Autor et al., 2003; Acemoglu et al., 2018) – the results obtained confirm this mechanism using data from TSL companies.

The differences observed compared to the results of macro-cross-sectional studies (where the GDP per capita logarithm often shows a positive and statistically significant direct relationship) can be explained by three factors. Firstly, the so-called ceiling effect – in the pair of countries analysed, some companies have already achieved a high level of implementation of “smart” solutions, which limits further growth of the indicator as a function of affluence. Secondly, the composition of the study sample – taking into account the company size and business activity profile, the relationship between affluence and the degree of digitalization may be depleted. Thirdly, partial mediation or variance competition between the log GDP per capita and LPI variables is possible.

The robustness tests performed (including replacing the economic development measure with GNI-GNI per capita, including the HICP, interest rates, and e-commerce share with a one-period lag, as well as standardizing variables and analysing the VIF, AIC, and BIC indices) have not changed the direction or significance of the key effects of LPI and UNEMP, which strengthens the credibility of the results obtained.

Consequently, the survey confirms the significant role of environmental and labour market factors in the processes of logistics digitalization, while simultaneously enriching the existing literature with empirical verification of the moderating effect of the LPI using microeconomic data from two Central and Eastern European economies.

When interpreting the results obtained, it is important to consider the specific conditions of logistics industry in both countries. The logistics sector in Poland features a high share of road transport in the transport structure, the growing importance of contract logistics and a strong dependence on fuel and labour costs. In Lithuania, on the other hand, international and transit transport play a significant role, especially on the east-west axis, while the scale of the domestic market remains smaller. In both cases, the industry is

o substytucji pracy technologią i zmianie popytu na umiejętności (Autor i in., 2003; Acemoglu i in., 2018) – uzyskane wyniki potwierdzają ten mechanizm na danych firm TSL.

Zaobserwowane różnice w stosunku do wyników badań o charakterze makro przekrojowym (w których logarytm PKB per capita często wykazuje dodatnią i istotną statystycznie zależność bezpośrednią) można wyjaśnić trzema czynnikami. Po pierwsze, tzw. efekt nasycenia (ceiling effect) – w analizowanej parze krajów część przedsiębiorstw osiągnęła już wysoki poziom implementacji rozwiązań typu „smart”, co ogranicza dalszy wzrost wskaźnika w funkcji zamożności. Po drugie, skład próby badawczej – po uwzględnieniu wielkości firm i profilu prowadzonej działalności gospodarczej związek między poziomem zamożności a stopniem cyfryzacji może ulegać osłabieniu. Po trzecie, możliwa jest częściowa mediacja lub konkurencja o wariancję pomiędzy zmiennymi log PKB per capita a LPI.

Przeprowadzone testy odporności (obejmujące m.in. zamianę miary rozwoju gospodarczego na GNI-DNB per capita, dołączenie wskaźników HICP, stóp procentowych i udziału e-commerce z opóźnieniem o jeden okres, a także standaryzację zmiennych oraz analizę wskaźników VIF, AIC i BIC) nie zmieniły kierunku ani istotności kluczowych efektów LPI i UNEMP. Wzmacnia to wiarygodność uzyskanych wyników.

W konsekwencji badanie potwierdza znaczącą rolę czynników środowiskowych i rynku pracy w procesach cyfryzacji logistyki, jednocześnie wzbogacając dotychczasowy dorobek literatury o empiryczną weryfikację efektu moderacyjnego wskaźnika LPI na danych mikroekonomicznych pochodzących z dwóch gospodarek Europy Środkowo-Wschodniej.

Interpretując uzyskane wyniki, należy uwzględnić branżowe uwarunkowania logistyki w obu krajach. Sektor logistyczny w Polsce charakteryzuje się wysokim udziałem transportu drogowego w strukturze przewozów, rosnącym znaczeniem logistyki kontraktowej oraz silnym uzależnieniem od kosztów paliw i pracy. Z kolei na Litwie istotną rolę odgrywają przewozy międzynarodowe i tranzytowe, zwłaszcza na osi wschód-zachód, a skala rynku wewnętrznego pozostaje mniejsza. W obu przypadkach występuje wysoka wrażliwość branży na czynniki

highly sensitive to macroeconomic factors (GDP, inflation, export demand) and seasonal factors (weather, traffic volume, industry conditions).

The survey results confirm that the quality of the logistics infrastructure and environment (LPI) is a key prerequisite for the diffusion of digital technologies in TSL companies, especially where the processes depend on the efficiency of transport, the supply chains, and international trade. The limited impact of economic affluence as such (log GDPpc) may result from the high heterogeneity of the industry where different sectors (transport, warehousing, contract logistics, courier logistics) implement “smart” solutions at a different pace. In the context of the labour market and human capital, the results confirm the growing importance of digital skills in logistics and the need for an active policy of developing and retraining employees, both at the corporate and public administration levels.

Comparison of these analyses leads to the conclusion that the implementation of smart logistics technologies is not a simple function of a single indicator, but rather the result of a complex interaction between economic affluence, the quality of logistics infrastructure, and the labour market situation. In countries with high GDP per capita, low unemployment and a good LPI, technology implementation is faster and more effective, and their impact on economic efficiency is significantly higher than in countries with less favourable environments.

Conclusions

The joint analysis of 104 logistics companies from Poland and Lithuania revealed significant diversity in the level of digital technology adoption across countries and significant links with the macroeconomic conditions. The OLS models (controlling for company size and age and country-level clustering errors) explain approximately 40-47% of the variability in IATL, which we recognise as a good matching for cross-sectional company data.

H1 was not confirmed as a positive relationship between GDP per capita and IATL – the level of economic affluence alone is not a sufficient predictor of logistics digitalization. This is consistent

makroekonomiczne (PKB, inflacja, popyt eksportowy) oraz sezonowe (pogoda, natężenie ruchu, koniunktura w przemyśle).

Wyniki badań potwierdzają, że jakość infrastruktury i otoczenia logistycznego (LPI) stanowi kluczowy warunek dyfuzji technologii cyfrowych w przedsiębiorstwach TSL – szczególnie tam, gdzie procesy są uzależnione od sprawności transportu, łańcuchów dostaw i wymiany międzynarodowej. Ograniczony wpływ samej zamożności gospodarki (log GDPpc) może wynikać z dużej heterogeniczności branży, w której różne gałęzie (transport, magazynowanie, logistyka kontraktowa, kurierska) w różnym tempie wdrażają rozwiązania „smart”.

W kontekście rynku pracy i kapitału ludzkiego wyniki potwierdzają rosnące znaczenie kompetencji cyfrowych w logistyce oraz potrzebę aktywnej polityki rozwoju kwalifikacji i przekwalifikowania pracowników – zarówno na poziomie firm, jak i administracji publicznej.

Zestawienie tych analiz prowadzi do wniosku, że wdrożenia inteligentnych technologii logistycznych nie są prostą funkcją pojedynczego wskaźnika, ale efektem złożonej interakcji pomiędzy dobrobytem gospodarczym, jakością infrastruktury logistycznej oraz sytuacją na rynku pracy. W krajach z wysokim PKB per capita, niskim bezrobociem i dobrym LPI, wdrożenia technologii przebiegają szybciej i skuteczniej, a ich wpływ na efektywność gospodarki jest znacznie wyższy niż w państwach z mniej sprzyjającym otoczeniem.

Wnioski

Analiza łączna 104 przedsiębiorstw logistycznych z Polski i Litwy pokazała wyraźne zróżnicowanie poziomu adopcji technologii cyfrowych między krajami oraz istotne powiązania z uwarunkowaniami makro. Modele OLS (z kontrolą wielkości i wieku firm oraz błędami klastrzowanymi na poziomie kraju) wyjaśniają ok. 40-47% zmienności IATL, co uznajemy za dobre dopasowanie jak na przekrojowe dane firmowe.

Weryfikacja H1 nie potwierdziła dodatniej zależności między PKB per capita a IATL – sam poziom zamożności gospodarki nie jest wystarczającym predyktorem cyfryzacji logistyki. To spójne z obserwowanym „paradoksem

with the observed “income paradox” – a country with a higher GDP per capita may have a lower level of actual adoption if complementary implementation conditions are missing.

H2, on the other hand, was confirmed. A higher LPI score is strongly positively associated with the IATL and modifies the “GDP per capita – adoption” relationship, i.e., the better the infrastructure and the quality of logistics services, the stronger the propensity of companies to implement (a moderating effect). In practice, this means that the “macro” effect operates primarily through the quality of the logistics environment.

In relation to the labour market, H3 was confirmed. Higher unemployment is correlated with a lower IATL, which can be interpreted as a weaker pressure to modernize and lower expected benefits from automation in a less competitive labour market. At a company level, the company size has a positive impact (larger entities implement more technologies), while company age has no significant impact. The pace of digitization is determined more by resources and the organization than by the market experience alone.

The results obtained allow for the formulation of clear recommendations. Directions for action in public policy:

- prioritizing investments in LPI components (efficiency of clearance and procedures, infrastructure, tracking, and timeliness),
- accelerating document digitization and interoperability (e.g., e-CMR, EDI),
- programmes for development of digital and managerial competence in TSL,
- targeted support instruments that determine technology subsidies for the implementation of process changes and data integration.

Directions for action at a company level:

- phased implementation of projects with the highest benefit-to-cost ratio (telematics, analytics/prediction, advanced WMS),
- building data management and system integration capabilities,
- leveraging platforms and consortia to reduce entry costs.

The results clearly indicate that the economic affluence is not sufficient to accelerate digitalization; the key lever is the quality of the logistics environment, measured by the LPI, while labour

dochodowym” – kraj o wyższym PKB per capita może mieć niższy poziom faktycznej adopcji, jeśli brakuje komplementarnych warunków wdrożeniowych.

Z kolei H2 została potwierdzona. Wyższy wynik LPI jest silnie dodatnio skojarzony z IATL i modyfikuje relację „PKB per capita – adopcja”, tj. im lepsza infrastruktura i jakość usług logistycznych, tym silniejsza skłonność firm do wdrożeń (efekt moderacyjny). W praktyce to oznacza, że „makro” działa przede wszystkim przez kanał jakości środowiska logistycznego.

W odniesieniu do rynku pracy H3 potwierdzono. Wyższe bezrobocie koreluje z niższym poziomem IATL, co można interpretować jako słabszą presję na modernizację i niższe oczekiwane korzyści z automatyzacji przy mniej napiętym rynku pracy. Na poziomie cech firm dodatnio wyróżnia się wielkość przedsiębiorstwa (większe podmioty wdrażają więcej technologii), natomiast wiek firmy nie ma istotnego znaczenia. O tempie cyfryzacji decydują raczej zasoby i organizacja niż sam staż rynkowy.

Uzyskane wyniki pozwalają na sformułowanie jednoznacznych rekomendacji. Kierunki działań w politykach publicznych:

- priorytet dla inwestycji w komponenty LPI (sprawność odpraw i procedur, infrastruktura, śledzenie i terminowość),
- przyspieszenie cyfryzacji dokumentów i interoperacyjności (np. e-CMR, EDI),
- programy rozwoju kompetencji cyfrowych i menedżerskich w TSL,
- ukierunkowane instrumenty wsparcia, które warunkują dotacje na technologie realizacją zmian procesowych i integracją danych.

Kierunki działań na poziomie przedsiębiorstw:

- sekwencyjne wdrożenia o najwyższym stosunku korzyści do kosztów (telematyka, analityka/predykcja, zaawansowane WMS),
- budowa zdolności pracy z danymi i integracji systemów,
- wykorzystanie platform i konsorcjów do obniżenia kosztów wejścia.

Wyniki jednoznacznie wskazują, że zamożność gospodarki nie wystarcza do przyspieszenia cyfryzacji; kluczowym dźwigniowym czynnikiem jest jakość otoczenia logistycznego mierzona

market tensions further modulate companies' propensity to invest. Focusing interventions on improving LPI and digital competence should most quickly translate into the IATL growth and a sustainable competitive advantage for the logistics sector in both countries.

LPI, a napięcia na rynku pracy dodatkowo moduluje skłonność firm do inwestycji. Skupienie interwencji na poprawie LPI oraz kompetencji cyfrowych powinno najszybciej przełożyć się na wzrost IATL i trwałą przewagę konkurencyjną sektora logistycznego w obu krajach.

Literatura

1. Acemoglu D., Restrepo P. (2018). *The race between man and machine: Implications of technology for growth, factor shares, and employment*, American Economic Review, 108(6), 1488-1542. <https://doi.org/10.1257/aer.20160696>.
2. Andrews D., Nicoletti G., Timiliotis C. (2018). *Digital technology diffusion: A matter of capabilities, incentives or both?* OECD Economics Department Working Papers No. 1476. <https://dx.doi.org/10.1787/7c542c16-en>.
3. Angelo L. (2024). *Integrating ESG Principles into Smart Logistics: Toward Sustainable Supply Chains*. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5022211>.
4. Arvis J.-F., Ojala L., Wiederer C., Shepherd B., Raj A., Dairabayeva K., Kiiski T. (2018). *Connecting to Compete 2018: Trade Logistics in the Global Economy*, The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank, Washington. <https://doi.org/10.1596/29971>.
5. Autor D. H., Levy F., Murnane, R. J. (2003). *The skill content of recent technological change*, Quarterly Journal of Economics, 118(4), 1279-1333. <https://doi.org/10.1162/003355303322552801>.
6. Brynjolfsson E., Hitt L. M. (2000). *Beyond computation: Information technology, organizational transformation and business performance*, Journal of Economic Perspectives, 14(4), 23-48. <https://doi.org/10.1257/jep.14.4.23>.
7. Comin D., Hobijn B. (2004). *Cross-country technology adoption: making the theories face the facts*, Journal of Monetary Economics, Elsevier, vol. 51(1), 39-83.
8. DePietro R., Wiarda E., Fleischer, M. (1990). *The Context for Change: Organization, Technology, and Environmental*. [W:] Tornatzky L.G., Fleischer M. (red.). *The Process of Technological Innovation*, s. 151-175. Lexington, MA: Lexington Books.
9. Dirir S.A. (2023). *The potential of macroeconomic factors in shaping the landscape of technological development: a testimonial from upper-middle-income countries*, Business, Management and Economics Engineering, 21(1), 84-105. <https://doi.org/10.3846/bmee.2023.18360>.
10. Du J., Wang J., Liang J., Liang R. (2025). *Research on the impact of smart logistics on the the manufacturing industry chain resilience*, Scientific Reports, 15. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-93806-8>.
11. Dubey R., Bryde D.J., Blome C., Roubaud D., Giannakis M. (2021). *Facilitating artificial intelligence powered supply chain analytics through alliance management during the pandemic crises in the B2B context*, Industrial Marketing Management, 96. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2021.05.003>.
12. Ferrari A., Mangano G., Cagliano A.C., DeMarco A. (2023). *4.0 technologies in city logistics: an empirical investigation of contextual factors*, Operations Management Research, vol. 16. <https://doi.org/10.1007/s12063-022-00304-5>.
13. Filippi E., Bannò M., Trento S. (2023). *Automation technologies and their impact on employment: A review, synthesis and future research agenda*, Technological Forecasting and Social Change, vol. 191. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122448>.
14. Graetz G., Michaels G. (2018). *Robots at work*, Review of Economics and Statistics, 100(5), 753-768. https://doi.org/10.1162/rest_a_00754.
15. Hooks D., Davis Z., Agrawal V., Li Z. (2022). *Exploring factors influencing technology adoption rate at the macro level: A predictive model*, Technology in Society, 68, 101826. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2021.101826>.

16. Idrissi Z.K., Lachgar M., Hrimech H. (2024). *Blockchain, IoT and AI in logistics and transportation: A systematic review*, Transport Economics and Management, vol. 2. <https://doi.org/10.1016/j.team.2024.09.002>.
17. Linder S.B. (1961) *An Essay on Trade and Transformation*. Almqvist & Wiksells, Stockholm.
18. Liu Y., Kim S., Sun J. (2024). *The implications of smart logistics policy on corporate performance: Evidence from listed companies in China*, Heliyon, vol. 10, issue 17. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36623>.
19. Mao X. (2024). *Applications and challenges of smart technologies in supply chain management*, Management Studies, vol. 12, no. 5. DOI: 10.17265/2328-2185/2024.05.007.
20. Milgrom P., Roberts J. (1990). *The Economics of Modern Manufacturing: Technology, Strategy, and Organization*, The American Economic Review, 80(3), 511-528. <http://www.jstor.org/stable/2006681>.
21. Ohakwe C.R., Wu J. (2025). *The impact of macroeconomic indicators on logistics performance: A comparative analysis using simulated scenarios*, Sustainable Futures, vol. 9. <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.100567>.
22. Pan X., Li M., Wang M., Zong T., Song M. (2020). *The effects of a Smart Logistics policy on carbon emissions in China: A difference-in-differences analysis*, Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, vol. 137. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.101939>.
23. Paužuolienė J., Kaveckė I., Pyra M. (2024). *Smart Technologies Integration and Challenges in the Context of Logistics Companies*, European Research Studies Journal, vol. 27, issue 4. DOI: 10.35808/ersj/3631.
24. Pyra M. (2024). *Impact of the logistics sector on Poland's economic growth 2018-2022/ Wpływ sektora logistycznego na wzrost gospodarczy Polski w latach 2018-2022*, Economic and Regional Studies, 17(1). <https://doi.org/10.2478/ers-2024-0008>.
25. Pyra M., Paužuolienė J., Kaveckė I. (2025). *The importance of smart technology solutions for sustainable logistics in Poland*, LogForum Scientific Journal of Logistics 2025, vol. 21, issue 1. DOI: 10.17270/J.LOG.001138.
26. Sharps S., Smith T., Browne J., Large O., Subramanya R., Tay P., Ellina D., Atkinson I., Lythgow J., Murallidharan R. (2024). Report: *The Impact of AI on the Labour Market*. <https://institute.global/insights/economic-prosperity/the-impact-of-ai-on-the-labour-market>.
27. Tonzgon J.L., Nguyen H.O. (2021). *Effects of port-shipping logistics integration on technical and allocative efficiency*, The Asian Journal of Shipping and Logistics, 37(2). <https://dx.doi.org/10.1016/j.ajsl.2021.01.001>.
28. Yusof W.M., Rashid N., Shaharin N., Xuan L.K. (2024). *The Impact of Information Technology towards Logistics Performance*, International Journal of Academic Research in Economics & Management Sciences, vol. 13, issue 3. <http://dx.doi.org/10.6007/IJAREMS/v13-i3/22424>.
29. Wade M., Hulland J. *The Resource-Based View and Information Systems Research: Review, Extension, and Suggestions for Future Research*, MIS Quarterly, 28(1), 107-142. DOI: 10.2307/25148626.
30. Williamson O. E. (1985). *The Economic Institutions of Capitalism: Firms, Markets, Relational Contracting*, Free Press.
31. Zahra S.A., George G. (2002). *Absorptive Capacity: A Review, Reconceptualization, and Extension*, Academy of Management Review, 27(2). DOI: 0.2307/4134351.
32. Zhang L., Gong T., Tong Y. (2023). *The impact of digital logistics under the big environment of economy*, PLOS ONE, 18(4). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0283613>.

