

Mateusz ZACZYK
Politechnika Śląska
Wydział Organizacji i Zarządzania
Instytut Zarządzania, Administracji i Logistyki
mateusz.zaczyk@polsl.pl

METODY POMIARU ODPORNOŚCI ŁAŃCUCHA DOSTAW NA ZEWNĘTRZNE CZYNNIKI O CHARAKTERZE NEGATYWNYM

Streszczenie. W obliczu licznie występujących zdarzeń globalnych oraz regionalnych, zagrażających zarówno poczuciu bezpieczeństwa ludzi, jak i ciągłości funkcjonowania systemów technicznych, problematyka odporności rozpatrywanych struktur na zewnętrzne czynniki o charakterze negatywnym zyskuje coraz większe znaczenie. Odporność jest terminem interdyscyplinarnym, znajdującym swoje miejsce w licznych dziedzinach nauki, a także codziennym życiu człowieka. Sedno niniejszego artykułu stanowi opracowanie i przybliżenie kilku, spośród licznie występujących w literaturze, metod pomiaru i ewaluacji odporności rozpatrywanych struktur (w tym przypadku – łańcuchów dostaw). Artykuł ten poprzedzono wskazaniem definicji odporności, a także bardziej precyzyjnie – odporności łańcucha dostaw.

Słowa kluczowe: odporność, łańcuch dostaw, analiza problemów decyzyjnych

SUPPLY CHAIN RESILIENCE TO NEGATIVE EXTERNAL FACTORS MEASUREMENT METHODS

Abstract. In the face of numerous events that threaten both people's sense of security, as well as the continuity of technical systems, the issue of considered structures' resilience to negative external factors is becoming increasingly important. Resilience is an interdisciplinary term interpreted in numerous fields of science, as well as the daily life of human. The crux of this article is to develop a few methods of considered structures' (supply chains) resilience measurement and evaluation. This work was preceded by indication of supply chain resilience definitions.

Keywords: resilience, supply chain, Analytic Hierarchy Process

1. Odporność jako kategoria interdyscyplinarna

Próbie zdefiniowania terminu „odporność” należy rozpocząć od przeanalizowania łacińskiego słowa „resiliō”, które na język polski należałoby tłumaczyć jako „powrót do wcześniejszej formy” (ang. spring back, leap back)¹. Słownikowe definicje odporności, zaczerpnięte z opracowań anglojęzycznych, zakładają istnienie czynników zakłócających stabilność otoczenia rozpatrywanego systemu. Tłumacząc z angielskiego jest to zdolność do szybkiego powrotu do stanu normalnego po zaistnieniu pewnych trudności czy też zdolność substancji lub obiektu do powrotu do wcześniej prezentowanego kształtu².

Źródła stosowania terminu „odporność” w nauce należy doszukiwać się w materiałoznawstwie. W myśl specjalistów z tej dziedziny, odporność odzwierciedla zdolność materiału do odzyskiwania oryginalnego kształtu, utraconego w wyniku deformacji^{3,4}. Na przestrzeni lat, odporność okazała się pojęciem interdyscyplinarnym, znajdującym zastosowanie w wielu dziedzinach nauki, takich jak ekologia, psychologia czy ekonomia⁵. Przenosząc definicje pochodzące z różnych dziedzin nauki w realia systemów logistycznych, odporność można definiować jako zdolność systemu do przeciwstawienia się niekorzystnym zjawiskom występującym w jego otoczeniu. Dla właściwego zrozumienia tematyki odporności łańcuchów dostaw, należy uświadomić sobie jej ścisły związek z istnieniem środowiska pełnego ciągle występujących zmian, które mogą destabilizować otoczenie rozpatrywanego systemu^{6,7}. Precyzując analizowane pojęcie, można przytoczyć definicję nakierowaną na obecność zakłóceń. Odporność systemu logistycznego to zdolność do dostarczania, utrzymywania i poprawy jakości usług w obliczu zmian oraz zagrożeń ewolucyjnych. Autor tej definicji uznaje również za stosowne przeciwstawienie pojęciu odporności systemów pojęcia wrażliwości tychże systemów⁸. Jeżeli wrażliwość oznacza niezdolność przeciwstawienia się skutkom oddziaływania wrogo nastawionego otoczenia rozpatrywanego systemu, to odporność nazwać można „lekarstwem” na nadmierną wrażliwość systemu. Z powyższych rozważań wynika, że odporność łańcucha dostaw można określić jako zdolność do reagowania na nieoczekiwane zakłócenia i przywrócenia ciągłości realizowanych

¹ Lewis C.T.: *An Elementary Latin Dictionary*. American Book Company, New York, Cincinnati and Chicago 1890.

² <http://www.oxforddictionaries.com/definition/english/resilience>.

³ Sheffi Y., Rice J.Jr.: *A supply Chain View of the resilient Enterprise*. “MIT Sloan Management Review”, Vol. 47(1).

⁴ Avallone E.A., Baumeister T., Sadeqh A.: *Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers*. McGraw Hill Professional, 2007.

⁵ Ponis S.T.: *Supply Chain Resilience: Definition Of Concept And Its Formative Elements*. “The Journal of Applied Business Research”, Vol. 5/28, 2012.

⁶ Bukowski L.A.: *A unified model of dependability and resilience for complex systems*. Proceedings of the ESREL 2014 Conference, Wrocław 2014.

⁷ Świeboda J., Zając M.: *Synthesis of issue pertaining to the resilience of logistics systems*. Proceedings of the ESREL 2015 Conference, Zurich 2015.

⁸ Bukowski L.A.: *op.cit.*

procesów łańcucha dostaw⁹ czy zdolność do utrzymania, wznawiania oraz przywracania operacji po zaistnieniu wpływu zakłóceń¹⁰. Przegląd kilku definicji odporności łańcucha dostaw występujących w literaturze zaprezentowano w tabeli 1.

Tabela 1

Definicje odporności łańcucha dostaw

Autor	Definicja
Fiksel, Pettit (2010)	Zdolność złożonych systemów przemysłowych do przetrwania, dostosowania się i rozwoju w realiach burzliwych zmian.
Gaonkar (2007)	Zdolność do utrzymania, wznawiania i przywracania operacji po zaistnieniu zakłócenia.
Datta (2007)	Zdolność do wznawiania działalności po zaistnieniu nieszczęścia, a także proaktywne, zorganizowane poszukiwanie zdolności łańcucha dostaw do radzenia sobie z nieprzewidywanymi zjawiskami o charakterze negatywnym.
Falasca (2008)	Zdolność do redukcji prawdopodobieństwa zaistnienia zakłóceń oraz do zmniejszania skutków tych zakłóceń oraz do redukcji czasu potrzebnego do odzyskania wydajności.
Ponomarov/Holcomb (2009)	Zdolność adaptacyjna łańcucha dostaw do przygotowania się do nieoczekiwanych zdarzeń, reagowania na zakłócenia oraz utrzymania ciągłości działania.
Barroso (2011)	Zdolność do reagowania na negatywne skutki spowodowane przez zakłócenia w celu utrzymania celów łańcucha dostaw.

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: Ponis S.T.: Supply Chain Resilience: Definition Of Concept And Its Formative Elements. "The Journal of Applied Business Research", Vol. 5/28, 2012.

W trakcie analizowania znaczenia odporności łańcucha dostaw pojawia się pytanie o sposoby jej oceny. Poziom odporności łańcucha dostaw jest kategorią, która powinna być poddana rzetelnej ewaluacji. W literaturze można znaleźć liczne opracowania dotyczące sposobów i metod pomiaru odporności łańcucha dostaw (i nie tylko łańcucha dostaw).

2. Trójkąt odporności wg Bruneau

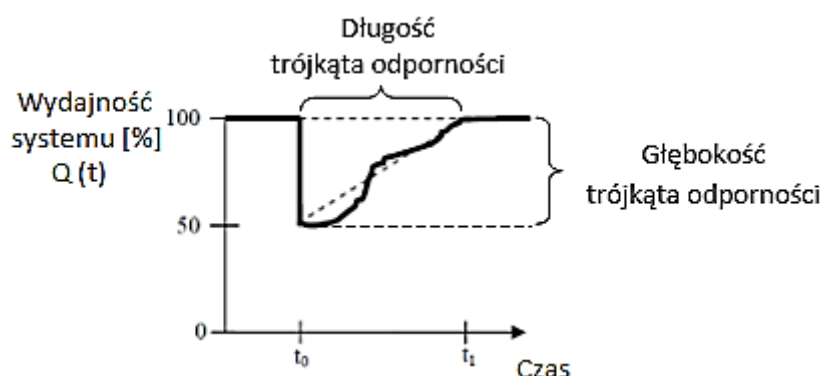
Jednym z najczęściej spotykanych w literaturze sposobów określania poziomu odporności rozpatrywanego systemu jest „trójkąt odporności”. Jedno z pierwszych zastosowań tego konceptu w literaturze miało miejsce w pracy powstałej pod redakcją M. Bruneau¹¹, dotyczącej społecznej odporności na skutki negatywnie oddziałujących zdarzeń katastroficznych (szczególnie przypadków katastrof naturalnych, trzęsień ziemi). Odporność społeczna definiowana jest przez autorów, jako zdolność jednostek społecznych do zmniejszania ryzyka oraz skutków zdarzenia katastroficznego w momencie jego zaistnienia, a także prowadzenia działań naprawczych w sposób minimalizujący oddziaływanie zakłóceń.

⁹ Barroso H.P., Machado V.H., Machado V.C.: Supply Chain Resilience Using the Mapping Approach, [in:] Pengzhong Li (ed.): Supply Chain Management. InTech, 2011.

¹⁰ Gaonkar R.S., Viswanadham N.: Analytical Framework for the Management of Risk in Supply Chains. "IEEE Transactions on Automation Science and Engineering", Vol. 4(2), 2007, p. 265-273.

¹¹ Bruneau M., Andrei R.: Seismic resilience of communities-conceptualization and operationalization. Proceedings of International workshop on Performance based seismic-design. Bled – Slovenia 2004.

Autorzy publikacji dokonali również konceptualizacji szerszej definicji odporności w warunkach wydajności systemu, która zakłada, że „odporność może być rozumiana jako zdolność do zmniejszania poziomu prawdopodobieństwa wystąpienia wstrząsu, absorbowania jego oddziaływania oraz odzyskania wydajności systemu na poziomie sprzed jego wystąpienia”¹². W opracowaniu Bruneau zaprezentował koncepcję trójkąta odporności, który odzwierciedla zdolność rozpatrywanego systemu, opisaną w powyżej cytowanej definicji. Trójkąt odporności ilustruje utratę funkcjonalności systemu ze względu na zaistnienie szkody lub zakłócenia i został przedstawiony na rys. 1.



Rys. 1. Trójkąt odporności wg M. Bruneau

Źródło: Bruneau M., Andrei R.: Seismic resilience of communities-conceptualization and operationalization. Proceedings of International workshop on Performance based seismic-design. Bled – Slovenia 2004.

Głębokość trójkąta (rys. 1) reprezentuje wielkość utraconej wydajności systemu (w tym przypadku wyrażonej w procentach), natomiast jego długość wskazuje na czas niezbędny do odzyskania poziomu wydajności sprzed zaistnienia zakłócenia. Działania organów decydujących o wydajności systemu (np. łańcucha dostaw) powinny być ukierunkowane na zmniejszanie „rozmiaru trójkąta odporności”. Z trójkąta można zatem odczytać poziom wydajności systemu przed i po zaistnieniu zakłócenia, a także czas niezbędny do uzyskania wydajności systemu na poziomie sprzed zaistnienia zdarzenia. Bruneau sugeruje, że utrata odporności (R) może być mierzona, jako rozmiar trójkąta przedstawionego na wykresie. Z matematycznego punktu widzenia można stwierdzić, że utrata odporności to¹³:

$$R = \int_{t_0}^{t_1} [100 - Q(t)] dt \quad (1)$$

Jednostki odpowiedzialne za kształtowanie odporności i utrzymywanie jej na możliwie najwyższym poziomie powinny dążyć do minimalizowania wartości R . Można do tego doprowadzić w dwojaki sposób:

¹² Ibidem.

¹³ D’Lima M., Medda F.: A new measure of resilience: An application to the London Underground, Transportation Research Part A: Policy and Practice. Vol. 81, November 2015, p. 35-46.

- $\min Q(t)$ – minimalizacja skutków zaistniałego zakłócenia – mniejsza głębokość trójkąta,
- $\min t$ – skracanie czasu niezbędnego do odzyskania stanu sprzed wystąpienia zakłócenia – mniejsza długość trójkąta.

Badacze zauważają przy tym, że redukcja rozmiaru trójkąta odporności, przy zachowaniu tego samego poziomu czasu powrotu do stanu sprzed zaistnienia zakłócenia t (recovery time), reprezentuje odporność statyczną, natomiast redukcja pola trójkąta odporności dzięki skróceniu tego czasu (przy stałym poziomie skutków zaistnienia zakłócenia) – odporność dynamiczną¹⁴.

3. SCRAM

Pettit, Fiksel i Croxton, specjaliści z Uniwersytetu Stanowego w Ohio, zaprezentowali inne podejście do problemu pomiaru i ewaluacji odporności. Opracowali oni narzędzie służące do oceny odporności łańcucha dostaw, którego nazwa brzmi Supply Chain Resilience And Management. Narzędzie to zostało oparte na dwóch wymiarach:

- **Punkty wrażliwości łańcucha dostaw** – „podstawowe czynniki, które sprawiają, że łańcuch dostaw jest podatny na zakłócenia”¹⁵; na podstawie badań eksperckich autorzy metody wyszczególnili siedem punktów wrażliwości, które opisano w tabeli 2.

Tabela 2

Punkty wrażliwości łańcucha dostaw

Punkt wrażliwości	Definicja
Zmienność otoczenia (burzliwość)	Stopień narażenia na częste zmiany czynników zewnętrznych
Celowe zagrożenia	Zamierzone ataki mające na celu zakłócenie działania lub spowodowanie szkód ludzkich, materiałowych i finansowych
Presja zewnętrzna	Występowanie napięć zewnętrznych, które powodują bariery biznesowe
Ograniczenia dla zasobów	Ograniczenia wynikające z braku dostępności zasobów do produkcji i dystrybucji
Wrażliwość procesów	Znaczenie warunków integralności produktów i procesów
Zależność od partnerów	Stopień zależności od zewnętrznych partnerów
Zakłócenia ze strony dostawców/klientów	Podatność dostawców i odbiorców na siły zewnętrzne lub zakłócenia

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: Pettit T., Fiksel J., Croxton K.: Ensuring supply chain resilience: development of a conceptual framework. “Journal of Business Logistics”, Vol. 31, No. 1, 2010.

¹⁴ Rose A.: Defining and Measuring Societal Resilience from an Economic, Environmental and Personal Security Perspective. Background paper for United Nations Development Programme Human Development Report, 2014.

¹⁵ Pettit T., Fiksel J., Croxton K.: Ensuring supply chain resilience: development of a conceptual framework. “Journal of Business Logistics”, Vol. 31, No. 1, 2010.

- **Zdolności łańcucha dostaw** – definiowane jako „atrybuty, które umożliwiają łańcuchowi dostaw przewidywanie oraz przeciwstawienie się zakłóceniom”¹⁶. Na podstawie badań eksperckich, autorzy metody wyszczególnili czternaście zdolności łańcucha dostaw, które opisano w tabeli 3.

Tabela 3

Zdolności łańcucha dostaw

Zdolność	Definicja
Elastyczność zaopatrzenia	Zdolność do szybkiej zmiany źródeł dostaw
Elastyczność realizowania zamówień	Zdolność do szybkiej zmiany środków transportu lub innych czynników związanych z realizowaniem zamówień
Dostępność środków produkcji	Dostępność środków do zapewnienia stałego poziomu produkcji
Efektywność	Zdolność do wytwarzania z minimalnym poziomem wymaganych zasobów
Widoczność (świadomość)	Znajomość stanu aktywów operacyjnych i środowiska
Adaptacyjność	Zdolność do modyfikowania operacji w odpowiedzi na zagrożenia i szanse
Przewidywanie	Zdolność dostrzegania potencjalnych przyszłych zdarzeń lub sytuacji
Odnawialność	Zdolność do szybkiego powrotu do stanu normalnego po zaistnieniu zakłócenia
Rozproszenie	Szeroka dystrybucja lub decentralizacja aktywów
Współpraca	Zdolność do efektywnej pracy z podmiotami zewnętrznymi dla wspólnych korzyści
Organizacja	Struktury organizacyjne, polityki, umiejętności, kultura organizacyjna
Pozycja rynkowa	Status przedsiębiorstwa na rynku
Bezpieczeństwo	Obrona przeciwko wtargnięciom, kradzieżom, atakom
Pozycja finansowa	Zdolność do absorbowania wahań w przepływach pieniężnych

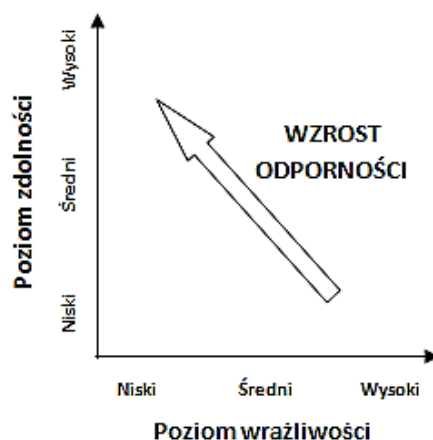
Źródło: Opracowanie własne na podstawie: Pettit T., Fiksel J., Croxton K.: Ensuring supply chain resilience: development of a conceptual framework. “Journal of Business Logistics”, Vol. 31, No. 1, 2010.

Poszczególne elementy dwóch powyższych tabel są oceniane w skali od 1 do 5 z wykorzystaniem badania ankietowego, w którym respondenci odpowiadają na kilka pytań, w ramach każdego z rozpatrywanych punktów wrażliwości lub zdolności łańcucha dostaw. Odpowiedzi ankietowanych znajdują odzwierciedlenie w punktowej ocenie poszczególnych elementów wrażliwości lub zdolności łańcucha dostaw. W najprostszym wariancie omawianego narzędzia, ogólną punktową ocenę wrażliwości łańcucha dostaw stanowi średnia arytmetyczna ocen poszczególnych punktów wrażliwości, natomiast ogólną punktową ocenę zdolności łańcucha dostaw (do przewidywania i przeciwstawiania się zakłóceniom) – średnia arytmetyczna ocen poszczególnych zdolności. Takie podejście zdaje się jednak być znacznym uproszczeniem, a co za tym idzie sugeruje się zastosowanie dodatkowego badania mającego na celu ustalenie wag (istotności) poszczególnych punktów wrażliwości oraz zdolności łańcucha dostaw. Uzyskane w ten sposób oceny można poddać analizie na wiele sposobów. Najbardziej czytelnym z nich jest graficzna prezentacja wyników na wykresie.

¹⁶ Ibidem.

Jako główną podstawę opisywanego narzędzia uznano cztery propozycje/stwierdzenia:

Propozycja 1 – odporność łańcucha dostaw wzrasta, gdy wzrasta poziom zdolności łańcucha dostaw oraz gdy spada poziom jego wrażliwość (rys. 2).



Rys. 2. Poziom zdolności łańcucha dostaw a poziom jego wrażliwości

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: Pettit T., Fiksel J., Croxton K.: Ensuring supply chain resilience: development of a conceptual framework. "Journal of Business Logistics", Vol. 31, No. 1, 2010.

Propozycja 2a – nadmierna wrażliwość łańcucha dostaw w stosunku do jego zdolności skutkuje wzrostem ekspozycji na ryzyko.

Propozycja 2b – nadmierny wzrost oceny zdolności łańcucha dostaw w stosunku do jego wrażliwości skutkuje spadkiem rentowności (zbyt wysokie koszty) realizowanego przedsięwzięcia.

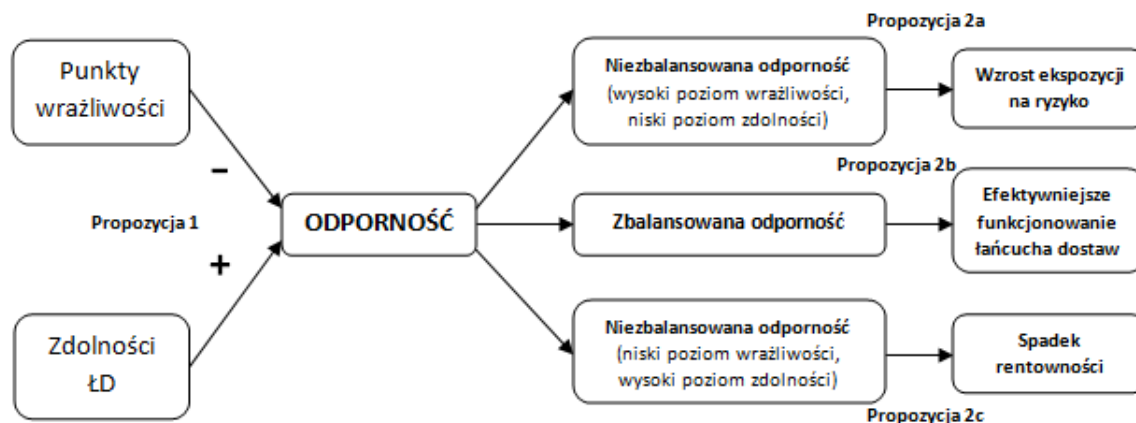
Propozycja 2c – funkcjonowanie łańcucha dostaw jest efektywniejsze, gdy jego zdolności oraz punkty wrażliwości są zbalansowane.



Rys. 3. Konsekwencje balansu zdolności/wrażliwość

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: Pettit T., Fiksel J., Croxton K.: Ensuring supply chain resilience: development of a conceptual framework. "Journal of Business Logistics", Vol. 31, No. 1, 2010.

Ogólna koncepcja postępowania w ramach metody SCRAM wraz z potencjalnymi efektami „niezbalansowanej odporności” została zilustrowana na rys. 4.



Rys. 4. Ogólna koncepcja narzędzia SCRAM

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: Pettit T., Fiksel J., Croxton K.: Ensuring supply chain resilience: development of a conceptual framework. “Journal of Business Logistics”, Vol. 31, No. 1, 2010.

Podsumowując, narzędzie SCRAM pozwala na określenie poziomu odporności łańcucha dostaw biorąc pod uwagę jego zdolności do przewidywania i stawiania czoła zakłóceniom jego funkcjonowania oraz punkty wrażliwości, rozumiane jako podstawowe czynniki, które sprawiają, że łańcuch dostaw jest podatny na zakłócenia. Autorzy narzędzia wykazali, że efektywniejsze funkcjonowanie łańcucha dostaw może zostać osiągnięte dzięki odpowiedniemu zbalansowaniu nacisku na minimalizację wrażliwości łańcucha dostaw oraz nacisku na kształtowanie zdolności do przeciwstawiania się zaistniałym zakłóceniom. Wskazali również potencjalne efekty nieodpowiedniego balansu pomiędzy analizowanymi czynnikami (rys. 4).

Niestety, narzędzie opracowane przez Petita ma wady. Jako dwie najistotniejsze, należy wskazać:

- Sztywność (ang. *rigidity*) – narzędzie opiera się na liście predefiniowanych czynników. Niektóre z nich mogą sprawiać wrażenie pozbawionych znaczenia w dzisiejszym turbulentnym otoczeniu łańcuchów dostaw. Jednak można odnieść wrażenie, że niektóre czynniki, które można by uznać za istotne, nie zostały wzięte pod uwagę przez twórców narzędzia.
- Duża subiektywność – ocena czynników branż pod uwagę opiera się wyłącznie na wskaźnikach jakościowych (skala Likerta). Każdy z ekspertów może interpretować sens i znaczenie poszczególnych czynników w nieco inny sposób, co może prowadzić do zniekształcenia wyników końcowych¹⁷.

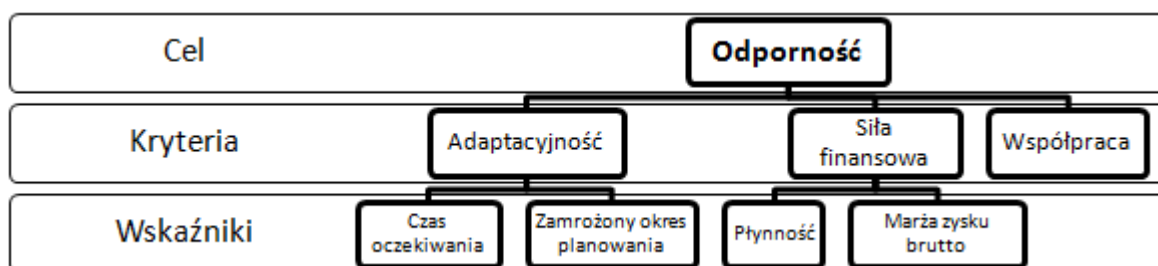
¹⁷ Lenort R., Wicher P.: Concept of a system for resilience measurement in industrial supply chain. In METAL 2013, 22nd International Conference on Metallurgy and Materials. [CD-ROM] TANGER, Ostrava 2013, p. 1982-1988.

4. Wykorzystanie analizy AHP do oceny odporności łańcucha dostaw

Próby opracowania systemu służącego do pomiaru odporności w łańcuchu dostaw, który minimalizowałby wady narzędzia SCRAM, podjęli się naukowcy czescy. R. Lenort oraz P. Wicher wykorzystali w tym celu wielokryterialną metodę hierarchicznej analizy problemów decyzyjnych (ang. *Analytic Hierarchy Process* – AHP). Opracowany przez nich system ewaluacji odporności łańcucha dostaw opiera się na dekompozycji zdolności, które wpływają na budowanie odporności na zbiór mierzalnych wskaźników. Wskaźniki te mogą mieć charakter jakościowy. Poszczególnym wskaźnikom przypisywane są odpowiednie wagi, które odzwierciedlają ich istotność.

Konkretne wskaźniki odporności oraz ich wagi (znaczenie) zostały przedstawione za pomocą metody AHP. Umożliwia ona dekompozycję problemu decyzyjnego w hierarchiczny system ważonych celów, kryteriów oraz mierzalnych wskaźników¹⁸. Proponowana procedura składa się z pięciu etapów.

a) Ustalenie struktury problemu decyzyjnego



Rys. 5. Struktura problemu decyzyjnego

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: Lenort R., Wicher P.: Concept of a system for resilience measurement in industrial supply chain. In METAL 2013, 22nd International Conference on Metallurgy and Materials. [CD-ROM] TANGER, Ostrava 2013, p. 1982-1988.

Struktura problemu decyzyjnego uwzględnia jego hierarchiczność. Przykład zaprezentowany na rys. 5 zakłada strukturę składającą się z trzech stopni. Autorzy podejścia proponują dekompozycję celu, jakim jest osiągnięcie przez łańcuch dostaw wysokiego poziomu odporności na szereg trzech kryteriów: adaptacyjność, siłę finansową oraz współpracę. Zaproponowali oni również konkretne wskaźniki do pomiaru poszczególnych kryteriów.

b) Konstrukcja zestawu macierzy porównywania parami

Drugim etapem analizowanej metody (AHP) jest porównywanie par. Każdy element górnego poziomu zostaje użyty do porównania elementów znajdujących się na poziomie o jeden niższym (w tym przypadku należy stworzyć jedną macierz porównującą kryteria z punktu widzenia celu oraz dwie macierze porównujące wskaźniki z punktu widzenia

¹⁸ Saaty T.L.: Decision making with the analytic hierarchy process. "International Journal of Services Sciences", Vol. 1, No. 1, 2008, p. 83-98.

kryteriów). Autorzy metody AHP rekomendują używanie dziewięciopunktowej skali określania istotności poszczególnych parametrów, gdzie 1 oznacza znikome znaczenie, a 9 – krytyczne znaczenie.

Przy założeniu N elementów, porównanie parami elementu i z elementem j daje macierz kwadratową A (o wymiarach $N \times N$), gdzie a_{ij} oznacza „porównawcze” znaczenie elementu i w odniesieniu do elementu j . W macierzy a_{ij} jest równe 1, gdy $i = j$. Zachodzi również równość $a_{ij} = 1/a_{ji}$.

c) Ustalenie względnej znormalizowanej wagi w_i każdego elementu

Ten etap zakłada ustalenie wag przez obliczenie geometrycznych średnich i -tego wiersza zgodnie ze wzorem:

$$w_i = \frac{[\prod_{j=1}^N a_{ji}]^{\frac{1}{N}}}{\sum_{i=1}^N [\prod_{j=1}^N a_{ij}]^{\frac{1}{N}}} \quad (2)$$

Na potrzeby niniejszego artykułu założono, że adaptacyjność została oceniona przez ekspertów (w skali od 1 do 9) na 5, siła finansowa na 4, natomiast współpraca na 3. Wówczas macierz porównywania parami kryteriów wraz z obliczeniem znormalizowanej wagi w_i wygląda następująco – tab. 4.

Tabela 4

Macierz porównywania kryteriów parami

	Adaptacyjność	Siła finansowa	Współpraca	w_i
Adaptacyjność	1	1,25	1,67	0,42
Siła finansowa	0,8	1	1,33	0,33
Współpraca	0,6	0,75	1,00	0,25

Źródło: Opracowanie własne.

d) Sprawdzenie spójności macierzy

Na tym etapie obliczany jest wskaźnik CR:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

CI to indeks spójności, natomiast RI jest losowym wskaźnikiem spójności, który zależy od N (tab. 5). Macierz uznaje się za spójną, gdy $CR \leq 0,1$.

Tabela 5

Wartości losowego wskaźnika spójności macierzy RI

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49

Źródło: Saaty T.L.: Decision making with the analytic hierarchy process. “International Journal of Services Sciences”, Vol. 1, No. 1, 2008, p. 83-98.

Indeks spójności oblicza się zgodnie ze wzorem:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - N}{N - 1}, \quad (4)$$

gdzie:

$$\lambda_{max} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(A \cdot w)_i}{w_i}, \quad (5)$$

A – macierz porównywania parami,

w – wektor znormalizowanej wagi.

W przykładowej macierzy $CI = 0$, więc $CR = 0$. Skutkuje to stwierdzeniem, że macierz można uznać za spójną, a wagi poszczególnych elementów na poszczególnych poziomach rozpatrywanego problemu decyzyjnego za właściwe. Z wykorzystaniem niniejszej procedury ustalono zatem wagi dla poszczególnych wskaźników odporności łańcucha dostaw (mierzalnych), co umożliwia ocenę odporności na podstawie realnie zbadanych, mierzalnych parametrów. Autorzy opisywanej metody pomiaru odporności łańcucha dostaw sugerują kilka możliwych sposobów analizy otrzymanych danych:

- porównanie obliczonych wartości z predefiniowanymi wartościami maksymalnymi (idealnymi) oraz minimalnymi,
- usystematyzowanie obliczonych wartości w ramy predefiniowanych kategorii (niski, średni, wysoki poziom odporności),
- ocena trendu w przypadku wielokrotnego pomiaru.

5. Wnioski

Opisane w niniejszym artykule metody różnią się od siebie znacząco, każda z nich charakteryzuje się pewnymi zaletami płynącymi z jej zastosowania, jednak żadna z nich nie jest pozbawiona wad. Metoda „trójkąta odporności” oferuje precyzyjny pomiar utraty odporności (im mniejsza utrata, tym większa odporność), jednak jest on możliwy jedynie w przypadku stosowania procedur pozwalających na określenie stopnia utraconej wydajności systemu. Kształt trójkąta będącego wynikiem implementacji stosowania metody sugeruje kadrze zarządzającej jedno z dwóch podejść do wzmacniania prezentowanej przez łańcuch dostaw odporności – minimalizowanie skutków zaistniałych zakłóceń lub skracanie czasu niezbędnego do odzyskania wydajności sprzed wystąpienia zakłócenia. Głównymi zarzutami, jakie mogą paść wobec zasadności stosowania narzędzia SCRAM jest niewątpliwie wysoki stopień jego subiektywizmu oraz jakościowy charakter. Podstawową zaletą jest z kolei wskazanie konsekwencji nieodpowiedniego balansu między poziomem wrażliwości łańcucha dostaw a kształtowaniem zdolności łańcucha dostaw do kreowania swojej odporności. Uzupełnieniem narzędzia SCRAM mogłoby być podejście wykorzystujące analizę AHP, które umożliwia precyzyjne obliczenie wag czynników wpływających na określenie

odporności rozpatrywanej struktury. Postępowanie zgodnie z jej założeniami wymaga jednak opracowania szczegółowych procedur służących do pomiaru poszczególnych wskaźników, które przekładają się na ewaluację odporności łańcucha dostaw.

Bibliografia

1. Avallone E.A., Baumeister T., Sadeqh A.: Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers. McGraw Hill Professional, 2007.
2. Barroso H.P., Machado V.H., Machado V.C.: Supply Chain Resilience Using the Mapping Approach, [in:] Pengzhong Li (ed.): Supply Chain Management. InTech, 2011.
3. Bruneau M., Andrei R.: Seismic resilience of communities-conceptualization and operationalization. Proceedings of International workshop on Performance based seismic-design. Bled – Slovenia 2004.
4. Bukowski L.A.: A unified model of dependability and resilience for complex systems. Proceedings of the ESREL 2014 Conference, Wrocław 2014.
5. D'Lima M., Medda F.: A new measure of resilience: An application to the London Underground, Transportation Research Part A: Policy and Practice. Vol. 81, November 2015.
6. Gaonkar R.S., Viswanadham N.: Analytical Framework for the Management of Risk in Supply Chains. "IEEE Transactions on Automation Science and Engineering", Vol. 4(2), 2007.
7. Kramarz W.: Modelowanie przepływów materiałowych w sieciowych łańcuchach dostaw. Odporność sieciowego łańcucha dostaw wyrobów hutniczych. Difin, Warszawa 2013.
8. Lenort R., Wicher P.: Concept of a system for resilience measurement in industrial supply chain. In METAL 2013: 22nd International Conference on Metallurgy and Materials [CD-ROM] TANGER, Ostrava 2013.
9. Lewis C.T.: An Elementary Latin Dictionary. American Book Company, New York, Cincinnati and Chicago 1890.
10. Pettit T., Fiksel J., Croxton K.: Ensuring supply chain resilience: development of a conceptual framework. "Journal of Business Logistics", Vol. 31, No. 1, 2010.
11. Pimm S.L.: The complexity and stability of ecosystems. "Nature", Vol. 307, 1984.
12. Rose A.: Defining and Measuring Societal Resilience from an Economic, Environmental and Personal Security Perspective. Background paper for United Nations Development Programme Human Development Report, 2014.
13. Saaty T.L.: Decision making with the analytic hierarchy process. "International Journal of Services Sciences", Vol. 1, No. 1, 2008.

14. Sheffi Y., Rice J.B. Jr: A supply Chain View of the resilient Enterprise. "MIT Sloan Management Review", Vol. 47(1).
15. Ponis S.T.: Supply Chain Resilience: Definition Of Concept And Its Formative Elements. "The Journal of Applied Business Research", Vol. 5/28, 2012.
16. Sutcliffe K.M., Vogus T.J.: Organizing for Resilience, [in:] Cameron K., Dutton J.E., Quinn R.E. (eds.): Positive Organizational Scholarship. Berrett-Koehler, Chapter 7. San Francisco 2003.
17. Świeboda J., Zajac M.: Synthesis of issue pertaining to the resilience of logistics systems. Proceedings of the ESREL 2015 Conference, Zurich 2015.
18. <http://www.oxforddictionaries.com/definition/english/resilience>, 28.12.2016.