

Roboty medyczne

Stan obecny i przyszłość robotyki
w opiece zdrowotnej w Polsce





Streszczenie

Roboty wykorzystywane są w medycynie od lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku. Jednak dopiero w ostatnich latach rozwój technologii przyspieszył na tyle, że obecnie mamy do czynienia z rosnącym w zawrotnym tempie upowszechnieniem robotyki o ochronie zdrowia. Dotyczy to nie tylko ich najbardziej popularnego zastosowania w postaci asystentów operacji chirurgicznych, których liczba przekroczyła już 2,5 mln rocznie, ale również wykorzystania w procesie farmakoterapii, rehabilitacji, poprawy jakości życia pacjenta i w wielu innych przeznaczeniach.

Upowszechnienie to nie odbywa się bez przyczyny. Wykorzystanie robotów w medycynie wiąże się z wieloma korzyściami, zarówno dla pacjenta, personelu medycznego, jak i systemów ochrony zdrowia. Optymalna realizacja tych korzyści wymaga jednak wsparcia systemowego. W związku z tym z niniejszej publikacji interesariusze systemu ochrony zdrowia mogą poznać podstawowe informacje na temat robotów medycznych, obecnego stanu rynku, rozwiązań organizacyjnych i technologicznych, czy wskazań do zastosowania robotów medycznych o relatywnie największym potencjale.

Ogólnie rzecz ujmując, roboty medyczne to **sterowane maszyny manipulacyjne lub lokomocyjne wykorzystywane w celach medycznych, przede wszystkim terapeutycznych lub diagnostycznych**. Taki opis robotów medycznych potwierdza ich różnorodność. Wykorzystywane są one w diametralnie różnych zastosowaniach, mają różną budowę, wielkość i autonomię działania.

»KLASYFIKACJA

Ze względu na ich zastosowanie, można je podzielić na dwie podstawowe kategorie. Pierwszą z nich są roboty wspierające personel medyczny, które są obecnie najbardziej rozpowszechnione. Są to kompleksowe systemy chirurgiczne, pomoce nawigacyjne, roboty wspierające proces farmakoterapii, diagnostyki, organizacji dostarczania usług. Z drugiej strony istnieją roboty wspierające pacjenta, których wykorzystywanie jest obecnie mniej popularne.

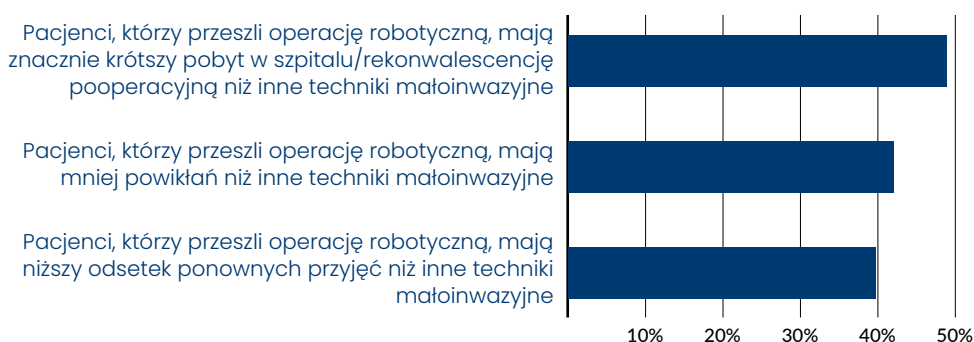
Roboty medyczne

Roboty wspierające personel medyczny	Roboty wspierające pacjenta
<ul style="list-style-type: none"> • Kompleksowe systemy chirurgiczne, w tym telechirurgiczne • Pomoce nawigacyjne i systemy precyzyjnego pozycjonowania • Roboty laboratoryjne oraz diagnostyczne • Roboty wspierające proces farmakoterapii • Roboty wspierające organizację dostarczania usług medycznych, przede wszystkim roboty dezynfekcyjne, apteczne, transportowe 	<ul style="list-style-type: none"> • Robotyczne wyroby transportowe, ortopedyczne i egzoszkielety • Roboty wspomagające rehabilitację układu mięśniowo-szkieletowego • Roboty socjalne • Protezy robotyczne

»KORZYŚCI

Robotyka medyczna już obecnie wykazuje przewagę nad metodami standardowymi w różnych warunkach opieki, zaś jej potencjał nie jest jeszcze wyczerpany. Pozytywnym efektem zastosowań robotycznych jest nie tylko poprawa wyników klinicznych, ale także ograniczenie kosztów m.in. w postaci skrócenia czasu trwania zabiegów lub czy zmniejszenia zapotrzebowania na siłę roboczą przy ich wykonywaniu.

Okazuje się, że chirurdzy w największych krajach Europy doceniają przede wszystkim efekty kliniczne stosowania robotów operacyjnych. Ponad 40% z nich zdecydowanie zgadza się, że korzystanie z robotów operacyjnych łączy się z krótszą hospitalizacją i rekonwalescencją, niższymi wskaźnikami powikłań oraz niższym odsetkiem ponownych przyjęć w porównaniu do innych technik małoinwazyjnych.



Źródło: Ipsos (2020): *Future of the Operating Room*.

Powyżej zidentyfikowane przewagi zastosowań robotycznych to jedynie trzy spośród szerokiego zestawu korzyści klinicznych, ekonomicznych i doświadczenia personelu medycznego, które zestawiono poniżej.

Korzyści kliniczne

- » Zwiększona precyzja
- » Niższa inwazyjność
- » Mniej powikłań i błędów
- » Ograniczone ryzyko ponownej interwencji medycznej
- » Krótsza interwencja medyczna i hospitalizacja, szybsza rekonwalescencja i powrót do normalnej aktywności

Doświadczenia personelu medycznego

- » Lepszy monitoring i wsparcie informacyjne
- » Umożliwienia wykonywania interwencji medycznych w niedostępnych, niebezpiecznych warunkach z wykorzystaniem niebezpiecznych substancji
- » Zmniejszone obciążenie fizyczne
- » Lepsze wsparcie niedoświadczonego personelu
- » Ustrukturyzowane programy szkoleniowe

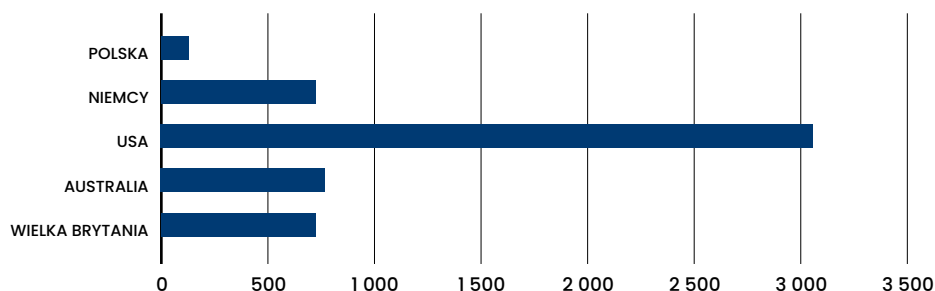
Efektywność kosztowa

- » Zmniejszone koszty dla ośrodków medycznych
- » Niższe koszty dla gospodarki
- » Uwolnienie mocy przerobowych personelu medycznego
- » Efektywniejsze wykorzystanie dostępnych zasobów
- » Zwiększona produktywność wybranych zadań.

» STAN RYNKU POLSKIEGO NA TLE WYBRANYCH KRAJÓW ŚWIATA

Liczba operacji robotycznych w relacji do populacji w Polsce na tle wybranych krajów świata świadczy o pewnym opóźnieniu we wdrażaniu tego typu technologii w naszym kraju. W 2022 r. liczba tego typu operacji na milion mieszkańców była ponad pięciokrotnie niższa niż w Niemczech, Wielkiej Brytanii czy Australii, natomiast aż dwudziestokrotnie niższa niż w USA – lidera operacji robotycznych na świecie.

Liczba operacji robotycznych na mln mieszkańców w 2022 r. w wybranych krajach świata.



» WSPARCIE SYSTEMOWE

W celu realizacji korzyści wynikających z zastosowania robotyki medycznej systemy ochrony zdrowia na świecie już stosują pewne narzędzia. Wśród nich warto wyróżnić:

- » Wspólne zakupy robotów medycznych na poziomie płatnika publicznego w Wielkiej Brytanii
- » Wyodrębnienie różnych zastosowań robotycznych w niemieckim systemie sprawozdawczym
- » W Stanach Zjednoczonych każde ubezpieczenie, które obejmuje chirurgię małoinwazyjną, zazwyczaj obejmuje chirurgię robotyczną. Dotyczy to szeroko rozpowszechnionych planów ubezpieczeniowych
- » Pacjenci sami decydują się na operacje robotyczne w Japonii, nawet gdy wiąże się to z ich współfinansowaniem

» IDENTYFIKACJA PROCEDUR O NAJWYŻSZYM POTENCJALNE ZASTOSOWAŃ ROBOTYCZNYCH

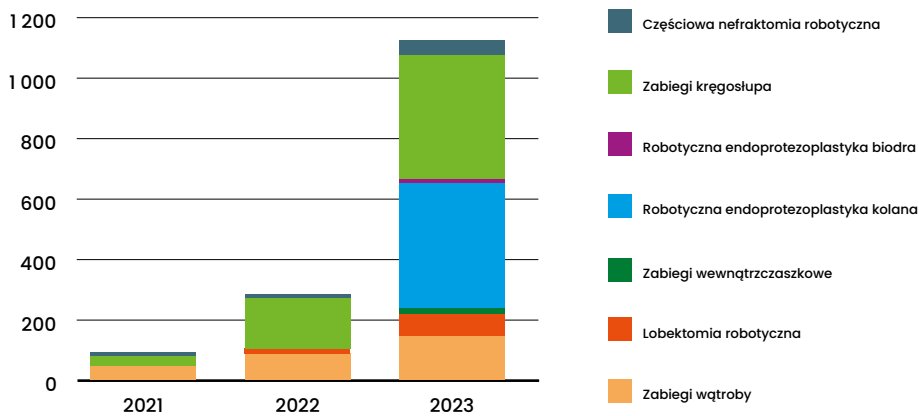
W Polsce podstawowym rodzajem wsparcia robotyki medycznej są odrębne, wyższe niż w przypadku standardowych procedur, wyceny wybranych operacji robotycznych. Opierając się na tym systemie wsparcia, propozycje procedur, których indywidualna wycena może przynieść największe potencjalne korzyści to:

- » Chirurgia miękka: zabiegi wątroby
- » Chirurgia miękka: częściowa nefrektomia
- » Chirurgia miękka: chirurgia raka płuca
- » Chirurgia kręgosłupa
- » Endoprotezoplastyka stawu kolanowego
- » Endoprotezoplastyka stawu biodrowego
- » Kompleksowe zabiegi wewnątrzczaszkowe

Niektóre z wymienionych procedur są już szeroko rozpowszechnione w innych krajach świata. Przykładem niech będzie nefrektomia. W Danii już w 77% przypadków nefrektomii wykonuje się jako zabieg laparoskopowy w asyście robota. Dodatkowo, dzięki możliwości wykorzystania robota nieco ponad 50% operacji raka nerki w Danii to chirurgia oszczędzająca ten organ.

W ostatnich latach widoczny jest skokowy wzrost liczby procedur o najwyższym potencjale zastosowania asysty robota. Świadczy to o sensowności stosowania robotów medycznych w tych zastosowaniach. W okresie 2021-2023 wzrosła ona prawie 14-krotnie.

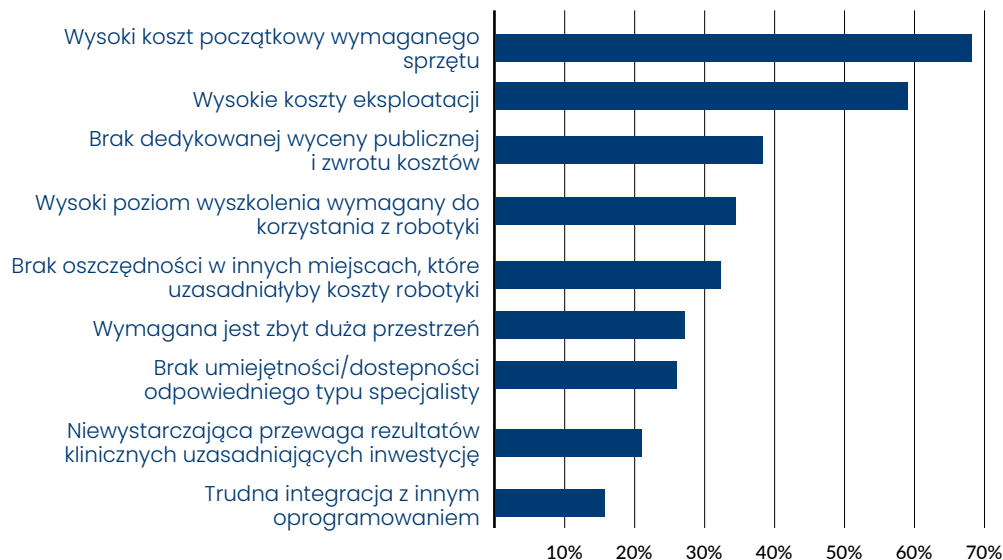
Szacowana liczba zabiegów robotycznych w Polsce w procedurach o najwyższym potencjale



»BARIERY

Na podstawie analiz polskiego rynku oraz ankiety wśród chirurgów robotycznych w największych krajach Europy należy stwierdzić, że podstawową barierą stojącą na drodze do upowszechnienia robotyki medycznej są aspekty ekonomiczne. Chirurgi z wybranych krajów Europy w zdecydowanie niższym stopniu wskazują na bariery technologiczne czy edukacyjne i kadrowe. Pomijają zaś praktycznie bariery regulacyjne i natury etycznej.

Odsetek europejskich chirurgów wykonujących operacje robotyczne, którzy zdecydowanie zgadzają się z każdą wymienioną barierą (ocenione na 6 lub 7 w 7-stopniowej skali; próba 170 chirurgów z Niemiec, Włoch, Hiszpanii, Francji i Wielkiej Brytanii)



Źródło: Ipsos (2020): Future of the Operating Room

REKOMENDACJE

Dla regulatora i płatnika publicznego

- » System finansowania publicznej opieki zdrowotnej powinien iść w kierunku koncepcji opieki zdrowotnej opartej o wartość – wspierałoby to adopcję rozwiązań robotycznych, które często wykazują swoją przewagę ekonomiczną nad standardowymi metodami w długim okresie czasu.
- » Do czasu wdrożenia koncepcji opieki zdrowotnej opartej o wartość należy wspierać zastosowania robotyczne poprzez ich indywidualną wycenę w ramach jednolitych grup pacjentów.
- » Cennym elementem porządkującym rynek byłoby określenie czytelnej i przewidywalnej strategii i oczekiwanego przez organy administracji docelowego modelu rozwoju tego segmentu.
- » Potrzeba monitorowania jakości procedur robotycznych np. poprzez wdrożenie rejestrów zabiegów robotycznych i docelowe powiązanie finansowania z wynikami terapii.

Dla personelu medycznego

- » Zadaniem pracowników służby zdrowia jest otwarta i przejrzysta komunikacja z pacjentami na temat zastosowań robotycznych.
- » Wypracowanie odpowiednich zachęt i warunków do podwyższania kwalifikacji operatorów, nadzoru i możliwości doskonalenia umiejętności.

Dla instytucji finansujących

- » Upowszechnienie różnorodnych modeli finansowania, jak np. umowy o zakupach grupowych, leasingi i wypożyczenia, ustalenia dotyczące finansowania długoterminowego lub partnerstwa.
- » Możliwość finansowania wykorzystania używanych robotów medycznych w zainteresowanych tego typu produktami ośrodkach.

Dla uczelni i towarzystw naukowych

- » Wprowadzenie podstawowego modułu nauczania na uczelniach publicznych, który wspierałby edukację w zakresie możliwości urządzeń robotycznych, ale nie zastąpiłby dedykowanych szkoleń technicznych.
- » Wprowadzenie np. dedykowanych sekcji lub grup roboczych, np. w ramach towarzystw naukowych, których celem byłoby stałe monitorowanie stanu rozwoju rynku robotycznego w danej dziedzinie i poszukiwanie możliwości poprawy możliwości szkoleniowych personelu.

Spis treści

Streszczenie	2
1. Roboty w sektorze ochrony zdrowia	10
1.1. Różnorodność robotów medycznych	12
1.2. Struktura rynku i główni gracze.....	13
1.3. Korzyści stosowania robotyki.....	16
1.4. Przyszłość robotyki w ochronie zdrowia	22
2. Aktualny stan wdrożenia rozwiązań robotycznych.....	25
2.1. Doświadczenia na wybranych rynkach zagranicznych.....	26
2.2. Rozwiązania systemowe na rzecz zastosowań robotycznych w ochronie zdrowia.....	29
2.3. Porównanie stanu wdrażania robotyki medycznej w Polsce i na świecie.....	31
2.4. Dotychczasowy stan wdrażania robotyki medycznej w polskim publicznym systemie opieki zdrowotnej.....	32
3. Obszary wykorzystania rozwiązań robotycznych w ochronie zdrowia o największym potencjale i korzyściach	37
3.1. Chirurgia miękka: zabiegi wątroby.....	38
3.2. Chirurgia miękka: częściowa nefrektomia	38
3.3. Chirurgia miękka: chirurgia raka płuca.....	39
3.4. Chirurgia kręgosłupa	40

3.5. Endoprotezoplastyka stawu kolanowego.....	41
3.6. Endoprotezoplastyka stawu biodrowego.....	42
3.7. Kompleksowe zabiegi wewnątrzczaszkowe.....	43
3.8. Dotychczasowe doświadczenia i potencjał zabiegów robotycznych w wymienionych procedurach w Polsce.....	43

4. Wyzwania, ograniczenia i bariery rozwoju polskiego rynku .47

4.1. Bariery ekonomiczne i organizacyjne.....	48
4.2. Bariery regulacyjne i natury etycznej.....	49
4.3. Bariery technologiczne	50
4.4. Bariery edukacyjne i kadrowe.....	51
4.5. Porównanie zidentyfikowanych barier dla Polski do doświadczeń europejskich.....	52

5. Rekomendacje wsparcia zastosowań robotycznych w ochronie zdrowia.....53

5.1. Rekomendacje dla regulatora i płatnika publicznego	54
5.2. Rekomendacje dla personelu medycznego	54
5.3. Rekomendacje dla instytucji finansujących.....	55
5.4. Rekomendacje dla uczelni i towarzystw naukowych.....	55
Piśmiennictwo.....	56



**Roboty w sektorze
ochrony zdrowia**

Nauka i technologia są motorem wzrostu i podstawowym powodem poprawy globalnego dobrobytu. Wnoszą wkład w rozwój niemal każdej dziedziny naszego życia. Dotyczy to również medycyny. Technologia zapewniła radykalną poprawę procesów terapeutycznych i ich efektów, dostępności usług zdrowotnych oraz efektywności funkcjonowania sektora zdrowia.

Innowacją, która może znacząco przyczynić się do dalszego postępu w dostarczaniu wysokiej jakości usług zdrowotnych są roboty medyczne. Chociaż dokładna definicja byłaby stosunkowo skomplikowana¹, roboty medyczne można ogólnie określić jako:

Sterowane maszyny manipulacyjne lub lokomocyjne wykorzystywane w celach medycznych, przede wszystkim terapeutycznych lub diagnostycznych

Pod koniec lat 80. zbudowano pierwsze komercyjne roboty chirurgiczne¹ i po raz pierwszy wykorzystano komercyjne protezy mioelektryczne w ośrodkach rehabilitacyjnych na całym świecie². Od tego czasu nastąpił niebywały postęp w technologiach robotycznych w medycynie. Obecnie roboty mogą w znacznym stopniu wspomóc człowieka w czynnościach ruchowych, odbieraniu bodźców i procesowaniu informacji. W związku z tym, w ciągu ostatnich trzech dekad nastąpiło upowszechnienie wykorzystania robotów w sektorze zdrowia. Są one coraz częściej używane do wykonywania rosnącej liczby zadań. Równoległe z rozwojem technologii oraz rosnącymi potrzebami, zakres problemów zdrowotnych i stopień wsparcia w ich przezwyciężeniu przy użyciu robotów z pewnością będzie się nadal zwiększał.

Jak pokazują obecne trendy, proces ten wydaje się być nieunikniony. Jest to bezpośrednim rezultatem wymiernych korzyści dla pacjenta, personelu medycznego i systemów ochrony zdrowia ogółem, które oferuje zastosowanie robotycznych wyrobów medycznych, przy często niewystarczających zasobach personelu medycznego. Niniejsza publikacja ma na celu wspomóc ten proces na rynku polskim.

Po pierwsze, omawia ona ogólne potrzeby i korzyści stosowania robotyki w medycynie. Następnie ocenia stan rozwoju rynku robotycznych wyrobów medycznych w Polsce, także na tle innych krajów na świecie. Po trzecie, sugeruje konkretne obszary wykorzystania robotów medycznych, których wsparcie należałoby rozważyć w naszym kraju. W tym celu rozpatrywane są również wyzwania i bariery, z którymi należy się zmierzyć, aby zwiększyć wykorzystanie robotów z korzyścią dla wszystkich interesariuszy. Na koniec prezentowane są rekomendacje ograniczenia tych barier.

Omówienie obecnego stanu zastosowań robotycznych jest sprawą podstawową. Kluczowe jest jednak spojrzenie w przyszłość – rozpoczęcie dyskusji, a następnie podjęcie kroków, które pozwolą na rozwój wykorzystania robotów medycznych w Polsce. Nie jest to zadanie łatwe, ponieważ musi brać pod uwagę uwarunkowania polskiego rynku ochrony zdrowia, w tym systemy finansowania, uprzedzenia oraz wrażliwości pacjentów oraz perso-

1. Pełna definicja byłaby stosunkowo skomplikowana i musiałaby odnosić się do niejednoznacznego terminu „robot”. Taka definicja nie jest kluczowa dla tej publikacji, a dodatkowo mogłaby być szybko zdezaktualizowana przez ciągle pojawiające się innowacje.

nelu medycznego, stan wiedzy i zasoby pracowników sektora służby zdrowia. Dodatkowo, należy także uwzględnić potwierdzone dowody na skuteczność kliniczną i efektywność ekonomiczną tych rozwiązań. Mamy nadzieję, że niniejsza publikacja co najmniej rozwieje pewne wątpliwości co do stosowania robotycznych wyrobów medycznych, a w konsekwencji przyczyni się do możliwie pełnego wykorzystania korzyści płynących ze stosowania rozwiązań robotycznych w polskim sektorze zdrowia.

1.1. Różnorodność robotów medycznych

Jak wspomniano wcześniej, już samo ustalenie definicji robota medycznego nie jest proste. Wynika to m.in. z różnorodności ich zastosowań. Zaczynając od umożliwienia dokładniejszych operacji chirurgicznych o krótszym czasie rekonwalescencji, poprzez nieinwazyjną diagnostykę trudno dostępnymi organów, kończąc na budowaniu umiejętności społecznych, roboty wykorzystywane są w diametralnie różnych zastosowaniach, mają różną budowę, wielkość i autonomię działania. W związku z tym istnieje wiele klasyfikacji robotów medycznych³. W oparciu o niektóre z nich⁴, ze względu na ich zastosowanie, można je podzielić następująco:

Roboty medyczne

Roboty wspierające personel medyczny	Roboty wspierające pacjenta
<ul style="list-style-type: none"> • Kompleksowe systemy chirurgiczne, w tym telechirurgiczne • Pomoce nawigacyjne i systemy precyzyjnego pozycjonowania • Roboty laboratoryjne oraz diagnostyczne • Roboty wspierające proces farmakoterapii • Roboty wspierające organizację dostarczania usług medycznych, przede wszystkim roboty dezynfekcyjne, apteczne, transportowe 	<ul style="list-style-type: none"> • Robotyczne wyroby transportowe, ortopedyczne i egzoszkielety • Roboty wspomagające rehabilitację układu mięśniowo-szkieletowego • Roboty socjalne • Protezy robotyczne

Powyższa klasyfikacja obejmuje praktycznie każdy rodzaj obecnie wykorzystywanych robotów medycznych. Jednak rozwój nowych technologii jest na tyle dynamiczny, że należy się spodziewać pojawienia się kolejnych, nowych zastosowań robotycznych w medycynie i nowatorskich rodzajów technologii robotycznych, nie uwzględnionych na powyższym schemacie.

Mit: „Roboty są niebezpieczne – zwiększają ryzyko błędu, mogą zrobić coś „za” lekarza, istnieją też wątpliwości w kwestiach danych i cyberbezpieczeństwa, zależności od prądu itd.”

Prawda: Roboty nie działają autonomicznie, lecz wspierają personel medyczny, który zawsze podejmuje ostateczne decyzje. Systemy robotyczne są wyposażone w liczne zabezpieczenia zapobiegające niekontrolowanej pracy urządzeń. W kwestii cyberbezpieczeństwa, systemy robotyczne są zabezpieczone podobnie jak tradycyjne komputery. Większość sprzętu medycznego, w tym roboty, jest również wyposażona w systemy awaryjnego zasilania. Część robotów medycznych posiada swój niezależny bank energii, pozwalający na zabezpieczenie zabiegu w przypadku nagłego wyłączenia zasilania.

Analizy najlepiej przebadanych pod kątem bezpieczeństwa robotów medycznych, a więc robotów chirurgicznych dowiodły, że korzystanie z nich nie łączy się z wysokim ryzykiem. W rzadkich przypadkach, kiedy wystąpią awarie (najczęściej narzędzi, a nie samego robota czy konsoli), zwykle można je naprawić, co rzadko prowadzi do obrażeń pacjenta⁵.

1.2. Struktura rynku i główni gracze

Wielość zastosowań robotów medycznych nie oznacza, że wszystkie z nich są równie popularne. Najpowszechniejsze są z pewnością roboty wspierające personel medyczny. Wśród nich największą grupę produktów stanowiły roboty chirurgiczne, a więc kompleksowe systemy chirurgiczne oraz pomoce nawigacyjne i systemy precyzyjnego pozycjonowania. Na całym świecie co roku przeprowadza się ponad 2,5 miliona operacji w asyście robota⁶. Liczba ta stale dynamicznie rośnie.

W przypadku kompleksowych robotów chirurgicznych mowa jest o systemach umożliwiających operacje telechirurgiczne z dostępem jedno- lub wieloportowym. Są to najbardziej zaawansowane systemy, których liczba zastosowań jest największa i z pewnością będzie rosła w przyszłości. Pomoce nawigacyjne i systemy precyzyjnego pozycjonowania służą zaś do wspomaganiania lekarzy w planowaniu przedoperacyjnym i przeprowadzeniu zabiegu. Umożliwiają one dokładne obrazowanie i pozycjonowanie np. punktów interwencji chirurgicznej, implantów, czy lokalizacji guzów. Są one w szczególności stosowane w chirurgii ortopedycznej, w tym urazowej, kręgosłupa, stawów, a także w neurochirurgii. Jednak niektóre z nich, jak na przykład egzoskop, mają zastosowanie w bardzo wielu obszarach. Praktycznie we wszystkich zabiegach z zakresu mikrochirurgii.

Rozwój rynku robotów operacyjnych, w tym kompleksowych robotów chirurgicznych oraz pomocy nawigacyjnych i systemów precyzyjnego pozycjonowania, spowodował zainteresowanie nim coraz większej liczby podmiotów.

Il. oszacowane na podstawie danych firmy Intuitive.

Zgodnie z jedną z analiz z 2024 r. jest aktualnie dostępnych 87 technologii robotycznego wspomaganie operacji chirurgicznych dostarczanych przez 75 firm z całego świata⁶. Poprzednia edycja analizy z 2022 r. zidentyfikowała 71 systemów oferowanych przez 63 firmy. Najpopularniejsze z nich to roboty: da Vinci firmy Intuitive, Mako firmy Stryker, Versius firmy CMR Surgical, Senhance firmy Asensus Surgical, Rosa firmy Zimmer Biomet, Hintori firmy Medcaroid, Hugo firmy Medtronic.

Kolejną grupą robotów są roboty laboratoryjne oraz diagnostyczne. Robotyka laboratoryjna odnosi się do wykorzystania systemów robotycznych i technologii automatyzacji w warunkach laboratoryjnych. Są one wykorzystywane do automatyzacji powtarzalnych i czasochłonnych zadań i procesów, które tradycyjnie byłyby wykonywane ręcznie. W tym celu automatyzacja laboratoriów obejmuje różnorodne systemy i urządzenia zrobotyzowane. Opierają się one przede wszystkim na ramionach robotycznych wykorzystywanych do manipulowania próbkami, operowaniu płytkami z wymazami, integracji działania różnych narzędzi, itp.

W tej grupie znajdują się również automatyczne systemy diagnostyczne, które są w stanie gromadzić dane do diagnozy medycznej za pomocą np. przypominających skórę czujników percepcji dotykowej lub mikrorobotów. Choć konstrukcja i funkcja mikrorobotów jest bardzo zróżnicowana, charakteryzują się one niewielkimi rozmiarami i zdolnością do manipulowania obiektami w mikroskali. Mikro/nanoroboty mogą selektywnie identyfikować jony metali, toksyny bakteryjne, białka lub komórki, oferując dokładną ich analizę przed zastosowaniem terapii w celu optymalnego leczenia choroby. Należy pamiętać, że mikroroboty mają zastosowanie także w leczeniu chorób, np. w chorobach kardiologicznych i neurologicznych, czy precyzyjnej farmakoterapii. Dlatego mikroroboty klasyfikowane są także w innych kategoriach robotów medycznych.

Roboty do sporządzania substancji farmaceutycznych wykorzystywane są przede wszystkim do sporządzania mieszanek substancji farmaceutycznych wykorzystywanych w chemioterapii. Równocześnie coraz częściej używane są do sporządzania mieszanek w celu zwiększenia bezpieczeństwa pacjentów i optymalizacji wydajności operacyjnej podczas produkcji sterylnych preparatów innych niż niebezpieczne.

Ważną kategorią robotów medycznych w tej grupie są również roboty wspierające dostarczanie usług medycznych. Wśród nich należy wyróżnić, m.in.:

- » Roboty apteczne, które upraszczają zarządzanie magazynami leków, zapobiegają błędom i marnotrawieniu zasobów.
- » Autonomiczne mobilne roboty dostawcze, których wyręczają personel medyczny w stosunkowo prostych czynnościach transportowych o wysokiej masie ładunków.
- » Roboty dezynfekcyjne wykorzystujące światło ultrafioletowe, ultradźwięki lub rozpylanie substancji chemicznych do dezynfekcji pomieszczeń i sprzętu medycznego.

Rodzaj robotów	Główni producenci		
Kompleksowe systemy chirurgiczne			
			
			
Systemy nawigacyjne i pozycjonujące			
			
			
Diagnostyczne i laboratoryjne			
			
			
Farmaceutyczne			
			
Apteczne			
			
			
Wspierające dostarczanie usług medycznych			
			
Dezynfekcyjne			
			























Zdecydowanie mniejszą część rynku niż roboty wspierające personel medyczny stanowią roboty medyczne wspierające pacjenta. W związku z tym, podmioty na nim działające mają często formę start-upów i jest ich relatywnie dużo. Wśród nich wyjątkiem mogą być protezy robotyczne. Takie roboty mające formę protezy mioelektrycznej wykorzystującej sygnały elektryczne generowane przez skurcze mięśni w pozostałej kończynie, aby kontrolować ruch, wykorzystywane są od około 40 lat. W związku z tym ich rynek należy uznać za zaawansowany, ale z uwagi na stały rozwój technologii, dalej w fazie wzrostu. Bardziej innowacyjną, dopiero wdrażaną technologią, są wielostawowe elementy protetyczne (ang. *Multi-Articulating Prosthetic Components, MPC*), które wykorzystują kombinację czujników i silników do kontrolowania ruchu kończyny.

Nieco mniej rozwinięty jest rynek robotów rehabilitacyjnych wykorzystywanych przede wszystkim w urazach ortopedycznych oraz problemach neurologicznych (np. po przebytych udarze). Wykorzystują one robotyczne ramiona do wspierania pacjentów w wykonywaniu ćwiczeń. Mogą one być wykorzystywane przy stosunkowo niższym zaangażowaniu personelu medycznego.

Rozwijającą się szybko kategorią robotów są wyroby wspomagające poruszanie się pacjenta, takie jak m.in. egzoszkielety. Pozwalają one na wsparcie pacjenta, przede wszystkim osób niepełnosprawnych w poruszaniu się.

Ostatnią już kategorią w tej grupie robotów medycznych są roboty socjalne, nakierowane przede wszystkim na poprawę zdrowia psychicznego pacjentów. Chociaż ich wykorzystanie na świecie nie jest wysokie (z wyjątkiem Japonii), w związku ze starzeniem się społeczeństwa, wiele firm uznało tę branżę za przyszłościową..

Ryc. 1 Zestawienie głównych producentów robotów medycznych wspierających pacjenta

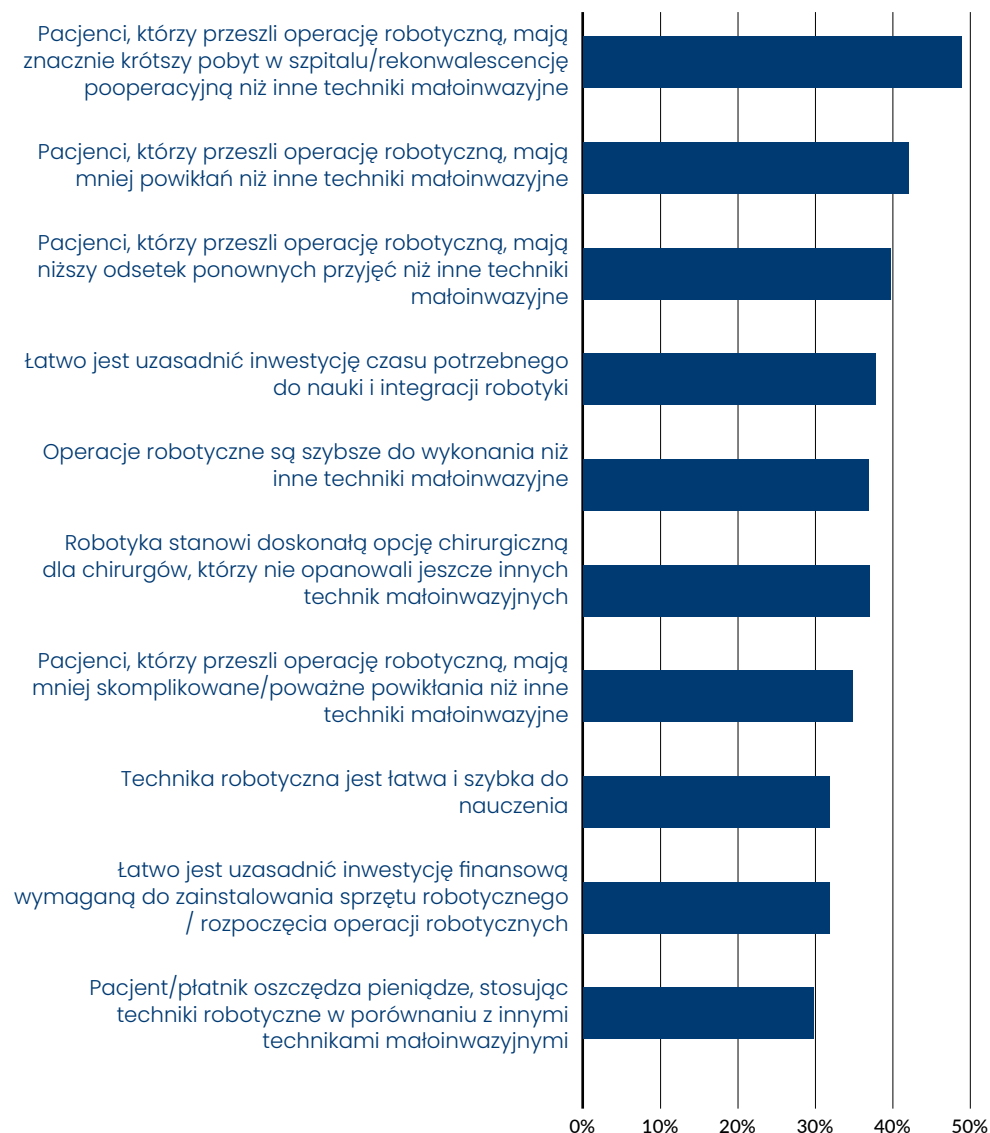
Rodzaj robotów	Główni producenci		
Protezy			
			
Rehabilitacyjne			
			
Wspierające ruch			
			
Socjalne			
			

1.3. Korzyści stosowania robotyki

Dokładność, elastyczność, powtarzalność i niezawodność to często wymieniane atuty technologii robotycznych w medycynie. Poprzez ich zastosowanie w diagnostyce, planowaniu przedoperacyjnym, chirurgii, ocenie pooperacyjnej, rehabilitacji i wsparciu pacjenta rosnąć ma jakość i dostępność oferowanych usług zdrowotnych.

Potwierdzeniem tych korzyści są opinie wykorzystującego je personelu medycznego, a więc przede wszystkim lekarzy chirurgów. Okazuje się, że chirurdzy w największych krajach Europy doceniają przede wszystkim efekty kliniczne stosowania robotów operacyjnych. Ponad 40% z nich zdecydowanie zgadza się, że korzystanie z robotów operacyjnych łączy się z krótszą hospitalizacją i rekonwalescencją, niższymi wskaźnikami powikłań oraz niższym odsetkiem ponownych przyjęć w porównaniu do innych technik małoinwazyjnych. Inne korzyści zauważane są wyraźnie przez co najmniej 30% ankietowanych chirurgów.

Ryc. 2 Odsetek chirurgów wykonujących operacje robotyczne, którzy zdecydowanie zgadzają się z wymienionymi korzyściami (ocenione na 6 lub 7 w 7-stopniowej skali; próba 170 chirurgów z Niemiec, Włoch, Hiszpanii, Francji i Wielkiej Brytanii)



Źródło: Ipsos (2020): Future of the Operating Room.

Mit: „Roboty są kupowane wyłącznie dla prestiżu i z powodu dostępnych na nie środków unijnych, dopłat i refundacji”

Prawda: Decyzje o zakupie tych urządzeń są podejmowane na podstawie ich rzeczywistych korzyści klinicznych. Przykłady takich decyzji opierają się na realnych potrzebach i korzyściach dla pacjentów. Świadczy o tym chociażby fakt, że do czasu wprowadzenia dedykowanych wycen publicznych operacji robotycznych większość tego typu procedur miała miejsce w sektorze prywatnym i w większości była finansowana z kieszeni pacjenta. Przykładowo, w 2019 r. sektor ten odpowiadał za 71% operacji robotycznych w Polsce.

Nabywanie robotów medycznych jest w niektórych przypadkach współfinansowane ze środków unijnych. Natomiast współfinansowanie wprowadzono ze względu na potwierdzone naukowo korzyści, które zastosowanie robotów w określonych procedurach niesie w długim terminie. Podobnie rzecz się ma w stosunku do publicznej odrębnej wyceny operacji robotycznych dla trzech procedur, która jest wyższa niż w przypadku operacji tradycyjnych. Oczywiście wyższa refundacja wynika z wyższych kosztów krótkookresowych operacji robotycznych. Natomiast poniesienie wyższych kosztów wiąże się z korzyściami klinicznymi i oszczędnościami systemu ochrony zdrowia w długim terminie.

Takie korzyści widoczne są także w statystykach danych publikowanych przez NFZ. Przykładowo, o ile w 2023 r. mediana dni hospitalizacji dla operacji prostatektomii metodą otwartą wyniosła 6 dni, a dla zabiegów laparoskopowych 4 dni, o tyle dla operacji robotycznych było to 3 dni.

Od czasu wprowadzenia pierwszych robotów medycznych korzyści z wykorzystywania robotyki w służbie zdrowia były wielokrotnie potwierdzane nie tylko ekspercką oceną personelu medycznego, ale również recenzowanymi badaniami naukowymi^{III}. Poniżej znajduje się zestawienie najważniejszych z tych korzyści wraz z wybranymi dowodami naukowymi je potwierdzającymi.

	Opis korzyści	Przykład dowodu naukowego
KORZYŚCI KLINICZNE	Zwiększona dokładność:	
	Chirurdzy mogą wykonywać zadania z dokładnością poniżej milimetra, minimalizując uszkodzenia tkanek. Roboty rehabilitacyjne precyzyjnie dopasowują opór do możliwości pacjenta. Protezy robotyczne zapewniają pacjentom dokładniejszą manipulację. Roboty apteczne mogą bardziej precyzyjnie dozować farmaceutyki.	Operacje siatkówki oraz ciała szklistego oka wspomagane robotem wymagają mniejszego o -0,71 odchylenia standardowego (SD) ruchu narzędzi skutkują o -0,32 SD mniejszym uszkodzeniem tkanek ⁷

III. Dotyczy to w szczególności robotów operacyjnych, których dotyczyła zdecydowanie największa liczba badań.

Niższa inwazyjność:

Precyzyjna kontrola oferowana przez narzędzia robotyczne może prowadzić do znacznego zmniejszenia utraty krwi podczas operacji, zminimalizowania potrzeby transfuzji krwi i związanego z tym ryzyka.

Zabiegi robotyczne zazwyczaj wymagają mniejszych nacięć niż chirurgia otwarta. W efekcie pacjent doświadcza mniejszego bólu, zmniejszonych blizn, niższego ryzyka infekcji i mniejszego dyskomfortu pooperacyjnego.

Mniejsze nacięcia chirurgii robotycznej i zminimalizowanie urazów tkanek często prowadzi do mniejszego bólu pooperacyjnego. Pacjenci odczuwają mniejszy dyskomfort, co zmniejsza potrzebę stosowania leków przeciwbólowych i sprzyja szybszemu powrotowi do zdrowia.

Pacjenci po robotycznej endoprotezoplastyce kolana doświadczyli o 23,7% mniejszej utraty krwi wobec operacji konwencjonalnej i ograniczyli ryzyko potrzeby transfuzji o 83%⁸

Robotyczna operacja nowotworu jelita wymagała nacięcia w wielkości 5 cm w porównaniu do 8 cm w przypadku operacji laparoskopowej przy ograniczonym bólu i potrzebie przyjmowania leków przeciwbólowych⁹.

W dziesięciostopniowej skali oceny bólu pooperacyjnego operacje robotyczne usunięcia macicy charakteryzowały się o 1,5 punktu niższym bólem wobec laparoskopowych¹⁰.

Mniej powikłań i błędów:

Precyzyjność narzędzi robotycznych i lepsza wizualizacja zapewniana przez obrazowanie 3D w wysokiej rozdzielczości przyczyniają się do mniejszej liczby powikłań śródoperacyjnych i pooperacyjnych. Chirurgi mogą manipulować tkankami z dużą dokładnością i kontrolą, zmniejszając ryzyko niezamierzonego uszkodzenia lub krwawienia.

Roboty apteczne ograniczają ryzyko błędów dozowania farmaceutyków.

Minimalnie inwazyjne zabiegi robotyczne niosą ze sobą mniejsze ryzyko infekcji ze względu na mniejsze nacięcia i mniejsze narażenie na zanieczyszczenia, co przyczynia się do poprawy bezpieczeństwa i zadowolenia pacjentów.

W przypadku operacji raka odbytnicy w grupie robotycznej wystąpiło mniej powikłań w okresie 30-dni 16,2% wobec 23,1% w przypadku laparoskopii oraz mniej powikłań śródoperacyjnych 5,5% wobec 8,7%¹¹.

Bezpieczeństwo pacjentów w aptekach obsługiwanych przez roboty apteczne rośnie nawet o 37%¹².

Pacjenci poddawani otwartej operacji kręgosłupa byli 5,77 razy bardziej narażeni na rozwój infekcji w porównaniu z metodami zrobotyzowanymi¹³.

Ograniczone ryzyko ponownej interwencji medycznej:

Pacjenci, którzy operowani są z wykorzystaniem robotów medycznych, rzadziej wymagają ponownej interwencji, np. przyjęcia do szpitala z powodu powikłań pooperacyjnych i infekcji, czy błędów w farmakoterapii.

Operacja robotyczna raka odbytnicy osób otyłych cechowała się 30-dniową rehospitalizacją wśród 6,3% pacjentów, wobec 19,7% wśród operowanych laparoskopowo¹⁴.

Robotyczna endoprotezoplastyka biodra dzięki precyzji implantacji czterokrotnie zmniejsza ryzyko zwichnięcia stawu biodrowego w porównaniu z operacją manualną i w obserwacji 4 letniej nie była przyczyną rewizji¹⁵.

Krótsza interwencja medyczna i hospitalizacja, szybsza rekonwalescencja i powrót do normalnej aktywności:

Chirurgia robotyczna często prowadzi do szybszego powrotu do zdrowia i zmniejszenia powikłań pooperacyjnych, co poprawia ogólną jakość życia pacjentów i zmniejsza koszty opieki zdrowotnej. Przy pomocy robotów rehabilitacyjnych możliwa jest szybsza rekonwalescencja.

Minimalnie inwazyjne podejście chirurgii robotycznej oferuje korzyści w postaci mniejszego bólu, mniejszych nacięć i mniejszej liczby powikłań niż tradycyjna chirurgia. W rezultacie pacjenci mogą zazwyczaj szybciej wznówić swoje codzienne czynności.

Pacjentki po robotycznym zespoleniu jajników zostały wypisane w ciągu 4 godzin po operacji; natomiast w grupie operacji otwartych średni czas pobytu w szpitalu wynosił 35 godzin¹⁶.

Pacjenci po całkowitej endoprotezoplastyce stawu kolanowego mogli wyprostować operowaną robotycznie nogę przeciętnie już po 20 godzinach podczas gdy operowani tradycyjnie potrzebowali na to ok. 30 godzin¹⁷.

Lepszy monitoring i wsparcie informacyjne:

Zwiększenia bezpieczeństwa poprzez poprawę parametrów technicznych i wsparcia informacyjnego w zabiegach w niebezpiecznej bliskości delikatnych struktur anatomicznych, także w wyniku korzystania z wielu czujników (siłowych, akustycznych itp.) w jednym czasie.

Rejestrowanie i przetwarzanie danych jako cennych narzędzi do szkolenia i certyfikacji personelu medycznego, w tym zapisu wideo i telemetrii (np. na temat zakresu ruchów wykonywanych w czasie zabiegu)

Kauteryzacja tkanek skutkuje dymem, który ogranicza widoczność operatora. Obecne technologie robotyczne mogą usunąć dym z obrazu widzianego przez chirurga¹⁸.

Umożliwienie wykonywania interwencji medycznych w niedostępnych, szkodliwych warunkach z wykorzystaniem niebezpiecznych substancji:

Roboty medyczne są pozbawione wrażliwości na promieniowanie, zatrucie, infekcje itp., którą cechuje się personel medyczny. Możliwe jest więc ograniczenie ryzyka utraty zdrowia personelu medycznego w trakcie wykonywania czynności.

Roboty do sporządzania substancji farmaceutycznych często wykorzystywane są w przypadkach substancji niebezpiecznych, np.: w chemioterapii. Skuteczność sporządzania takich substancji bez kontaminacji może być nawet 23-krotnie niższa niż w przypadku manualnego przygotowania farmaceutyku¹⁹.

Zmniejszone obciążenie fizyczne:

Roboty medyczne minimalizują obciążenie fizyczne odczuwane przez personel medyczny. W tradycyjnej chirurgii chirurdzy często utrzymują wymagającą fizycznie pozycję przez dłuższy czas, chirurdzy korzystający z robotów operują np. z pozycji siedzącej przy konsoli i mogą oni wykonywać skomplikowane zabiegi wygodniej i precyzyjniej.

Roboty transportowe umożliwiają transport ciężkich ładunków i pacjentów bez konieczności zbytniego obciążania personelu.

Operacje robotyczne najrzadziej wiążą się z fizycznym dyskomfortem lub zmęczeniem (8,3%) w porównaniu z laparoskopią (55,4%) i chirurgią otwartą (36,3%)²⁰.

Lepsze wsparcie niedoświadczonych chirurgów:

Chirurgia robotyczna jest bardziej korzystna dla mniej doświadczonych chirurgów, ponieważ umożliwia szybszy i dokładniejszy trening w porównaniu z chirurgią laparoskopową.

Zastosowanie robotów medycznych może zwiększać możliwości edukacji personelu, w tym liczby osób uczestniczących w obserwujących procedury medyczne.

Analiza jakości szycia wykonywanego robotycznie i laparoskopowo wykazała, że niedoświadczeni chirurdzy radzili sobie o wiele lepiej przy wykorzystaniu robota.²¹ Długość zabiegów była krótsza przeciętnie o 42%, długość ścieżki narzędzi chirurgicznych spadła o ok. 2/3, a płynność ruchów poprawiła się prawie o połowę.

Zaangażowanie rezydentów w przeprowadzane operacje poprzez transmisję obrazu zespołowi operacyjnemu przy zastosowaniu egzoskopu pozwoliło na szybsze zwiększenie umiejętności rezydentów w rozpoznawaniu struktur anatomicznych²².

Ustrukturyzowane programy szkoleniowe:

Takie programy, korzystające z możliwości technicznych robotów medycznych pozwalają na bardzo szybkie nabycie umiejętności i biegłości porównywalnej do doświadczonego personelu medycznego.

Operacje raka szyjki macicy prowadzone przez niedoświadczonych operatorów po ustrukturyzowanym szkoleniu nie łączyły się z wyższym ryzykiem negatywnych efektów klinicznych i nie skutkowały dłuższym czasem operacji, w porównaniu do doświadczonych chirurgów²³.

EFEKTYWNOŚĆ KOSZTOWA	<p>Zmniejszone koszty dla ośrodków medycznych:</p> <p>Chirurgia robotyczna często prowadzi do krótszych pobyków w szpitalu i niższego ryzyka rehospitalizacji niż tradycyjna chirurgia otwarta, co zmniejsza ogólne koszty hospitalizacji. To samo tyczy się rehabilitacji robotycznej. Czynniki te przyczyniają się do skrócenia czasu dochodzenia do zdrowia, uwolnienia zasobów opieki zdrowotnej i zmniejszenia związanych z tym kosztów.</p>	<p>Według jednego z badań pierwotny koszt prostatektomii robotycznej był wyższy przeciętnie o ok. 9 tys. USD, natomiast po dwóch latach był o 2 tys. USD niższy²⁴. Inna analiza potwierdza niższe o ok. 2 tys. USD zdyskontowane koszty operacji robotycznej²⁵.</p>
	<p>Zmniejszone koszty dla gospodarki:</p> <p>Szybszy powrót do zdrowia związany z wykorzystaniem robotów medycznych jest korzystny dla pacjentów, ponieważ umożliwia im szybszy powrót do pracy i normalnych czynności. Ponadto krótszy czas rekonwalescencji może zmniejszyć potrzebę świadczeń z tytułu tymczasowej niepełnosprawności, zmniejszając koszty pośrednie związane z utratą produktywności.</p>	<p>Badanie pacjentów po histerektomii wykazało niższą o ok. 200 USD utratę produktywności pacjentów po operacji robotycznej wobec laparoskopowej²⁶.</p>
	<p>Uwolnienie mocy przerobowych personelu medycznego:</p> <p>W wielu krajach widoczny jest problem braku personelu medycznego do opieki nad pacjentami czy dostarczaniem farmaceutyków. Roboty, w wielu wypadkach, są w stanie zastąpić ludzi oferując porównywalną jakość usług.</p>	<p>Potencjał pielęgniarek może być uwolniony poprzez zastąpienie ich podstawowych zadań transportowych, takich jak transport posiłków do pacjentów, zajmujących ok. 16% ich łącznego czasu pracy, przez roboty²⁷.</p>
	<p>Efektywniejsze wykorzystanie dostępnych zasobów:</p> <p>Dostępne zasoby medyczne mogą nie być w pełni wykorzystane, lub są marnowane. Zastosowanie robotów medycznych może ograniczyć te negatywne efekty, przykładowo poprzez monitorowanie stanu zasobów medycznych i przydatności do użycia</p>	<p>Raport hiszpańskiej Agencji Technologii Medycznych wykazał, że po wprowadzeniu robotów logistycznych do wydawania leków w szpitalach nastąpił spadek zapasów leków i związanych z tym kosztów o 26,4%, zaś marnotrawstwo leków z przeterminowanymi datami zmniejszyło się o 80%²⁸.</p>
	<p>Zwiększona produktywność wybranych zadań:</p> <p>W razie potrzeby robot może pracować 24 godziny na dobę i nie musi robić przerw.</p>	<p>Robot dezynfekcyjny wykazał o 60% niższe przestoje w wykonywaniu procedur medycznych w porównaniu do dezynfekcji manualnej²⁹.</p>

Mit: „Brakuje dowodów na przewagę procedur robotycznych wobec alternatywnych sposobów przeprowadzania zabiegów”

Prawda: Istnieje już obszerna i nadal rozwijająca się literatura naukowa badająca przewagę technologii robotycznych w medycynie w porównaniu do standardowych metod. Według jednej z analiz³⁰, co roku powstaje już ponad 2500 badań naukowych nt. robotów medycznych w obszarze medycyny (nie wliczając obszernej literatury z obszaru inżynierii). Literatura ta wielokrotnie potwierdzała korzyści ze stosowania robotów medycznych w określonych zastosowaniach, także w analizach o najwyższym poziomie w hierarchii dowodów naukowych, czyli metaanalizach i randomizowanych badaniach klinicznych. Jednocześnie warto podkreślić, że korzyści te nie są wykazywane w każdym przypadku gdzie możliwe jest zastosowanie robotów medycznych, co świadczy tylko o rozważnym i rzetelnym podejściu naukowców do tego zagadnienia.

1.4. Przyszłość robotyki w ochronie zdrowia

Jak można wywnioskować z powyżej przytoczonego zestawienia, robotyka medyczna już obecnie osiągnęła stan dojrzałości, dzięki któremu możliwe jest usprawnienie systemu opieki zdrowotnej i zapewnienia poprawy stanu zdrowia naszego społeczeństwa. Technologia robotyczna z powodzeniem doprowadziła do powstania cennych narzędzi do terapii, rehabilitacji, opieki nad dziećmi i osobami starszymi oraz szkoleń medycznych. Jednak rozwój technologiczny tej branży nadal postępuje bardzo szybko. Poniżej znajdują się główne kierunki spodziewanego rozwoju robotów medycznych i ich zastosowań w ochronie zdrowia w Polsce i na świecie:

- **Miniaturyzacja.** W związku z miniaturyzacją narzędzi i rozwojem technologii nastąpi upowszechnienie chirurgii z jednym portem, tj. minimalnie inwazyjnego podejścia, w którym wiele narzędzi robotycznych jest wprowadzanych przez jedno nacięcie. Spodziewane jest również upowszechnienie mikrochirurgii i supermikrochirurgii robotycznej. Mikrochirurgia to ogólne określenie operacji na bardzo małych strukturach żywych, np. na krtani, oku, drobnych naczyniach krwionośnych i limfatycznych, nerwach, wymagającej mikroskopu operacyjnego (lub innego systemu wizyjnego), zaś supermikrochirurgia jest rozwiniętą formą mikrochirurgii, operującą na strukturach mniejszych niż 0,8 mm. Precyzyjne roboty medyczne z odpowiednim obrazowaniem operowanej tkanki nadają się do tego typu zabiegów znakomicie. Nastąpi także upowszechnienie mikrorobotyki, maleńkich urządzeń robotycznych zaprojektowanych do wykonywania ukierunkowanych zadań w ludzkim ciele. Te miniaturowe roboty mogą być wykorzystywane w precyzyjnym dostarczaniu leków, naprawie tkanek, a nawet chirurgii eksploracyjnej w trudno dostępnych miejscach. Jednym z kierunków działań będzie wykorzystanie najbardziej miniaturowych spośród mikrorobotów, a więc nanorobotów. Te maleńkie urządzenia mają potencjał, aby zrewolucjonizować opiekę zdrowotną, umożliwiając celowane dostarczanie leków, wczesne wykrywanie raka i naprawę tkanek na poziomie komórkowym. Nanoroboty można zaprojektować tak, aby przenosiły ładunki środków terapeutycznych bezpośrednio do chorych lub uszkodzonych komórek i naczyń krwionośnych, oszczędzając zdrowe tkanki. Ta precyzja w dostarczaniu leków zmniejsza skutki uboczne i zwiększa skuteczność leczenia. Ponadto nanoroboty z czujnikami mogą wykrywać biomarkery związane z chorobą, umożliwiając wczesną diagnozę i interwencję.
- **Zastosowanie sztucznej inteligencji.** Algorytmy sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego umożliwią autonomiczność pewnych procedur chirurgii robotycznej. Systemy te analizują ogromne ilości danych pacjentów, pomagają w planowaniu operacji, a czasami wykonują pewne aspekty operacji przy zmniejszonej interwencji człowieka. Półautonomiczne urządzenia, które wykonują zadania chirurgiczne – takie jak przytrzymywanie zacisku na miejscu lub usuwanie uszkodzonych tkanek – mogą zacząć pojawiać się klinicznie w ciągu najbliższych 10 lat. Algorytmy sztucznej inteligencji będą coraz częściej wykorzystywane do przewidywania wyników operacji i identyfikowania potencjalnych powi-

kań. Analityka predykcyjna umożliwi personelowi przewidywanie wyzwań i wprowadzanie korekt w czasie rzeczywistym, co ostatecznie poprawi bezpieczeństwo pacjentów i wyniki interwencji medycznej.

- **Robotyka miękka.** Dzięki zastosowaniu niesztynnych konstrukcji mechanicznych miękka robotyka pozwoli na bezpieczniejsze interakcje z ludzkim organizmem w czasie badań i interwencji medycznych. Ponadto miękkie urządzenia robotyczne zapewniają większą swobodę ruchów i ułatwiają nawigację w ciasnych przestrzeniach, takich jak wnętrze ludzkiego ciała. Robot, stworzony z miękkich materiałów, jest z natury bezpieczniejszy niż sztywniejsze urządzenia. Może zmniejszyć potrzebę znieczulenia, ponieważ może łatwiej uniknąć naruszenia lub naciskania na organy wewnętrzne, np. ściany jelit w trakcie kolonoskopii.
- **Rozwój technologii sensorycznych i ich integracja.** Obecnie istnieją już modele posiadające sensoryczne sprzężenie zwrotne i percepcję dotykową tzw. haptkę. Jednak aby stało się to normą konieczne jest dalsze upowszechnienie i poprawa efektywności tego typu rozwiązań. Symulując odczuwanie dotyku, chirurdzy zyskają bardziej intuicyjne zrozumienie środowiska chirurgicznego, zwiększając kontrolę i precyzję. Dodatkowo upowszechniona zostanie augmentacja sensoryczna, zapewniając personelowi medycznemu lepsze informacje wizualne, słuchowe lub dotykowe. Przykładowo systemy rzeczywistości rozszerzonej (AR) i rzeczywistości wirtualnej (VR) mogą nakładać wizualizacje 3D, dane w czasie rzeczywistym lub przewodniki nawigacyjne na pole widzenia personelu medycznego. Popularyzacja tych technologii spowoduje m.in. integrację obrazowania i chirurgii w czasie rzeczywistym, co przełoży się na lepszą jakość i dopasowanie usług medycznych do stanu pacjenta. Dodatkowo upowszechnione będzie wykorzystywanie danych uzyskiwanych z innych urządzeń diagnostycznych. Fuzja obrazów i informacji diagnostycznych z różnych źródeł już mam miejsce, jednak nie jest standardem. Znacząco wpływa ona na precyzję, bezpieczeństwo i jakość leczenia.
- **Synergia człowieka i robota, w tym automatyzacja powtarzalnej pracy manualnej.** Przyszłość robotów medycznych będzie charakteryzować się dynamiczną synergią między personelem medycznym a systemami robotycznymi. Roboty, m.in. przy wykorzystaniu rozwijających się narzędzi sztucznej inteligencji, przejmą rutynowe i powtarzalne zadania, dzięki czemu personel będzie mógł skoncentrować się na podejmowaniu złożonych decyzji, które wymagają ich specjalistycznej wiedzy. Współpraca ta zwiększa precyzję i efektywność działań, uwalniając zasoby ludzkie, których niedobory są spodziewane w przyszłości.
- **Integracja robotów w systemy ochrony zdrowia zwiększająca dostępność usług.** Roboty medyczne wypełnią luki w opiece zdrowotnej na całym świecie. Luki te dotyczą przede wszystkim dostępności wykwalifikowanego personelu medycznego przy rosnącym popycie na usługi zdrowotne wynikającym m.in. ze starzenia się społeczeństwa i upowszechnienie chorób cywilizacyjnych. Spodziewane jest wyręczenie personelu w prostych zadaniach lub usprawnienie ich wykonywania. Upowszechnienie chirurgii zdalnej umożliwi pacjentom z odległych i niedostatecznie obsługiwanych obszarów szybki dostęp do specjalistycznych usług chirurgicznych.

- **Upowszechnienie jednodniowych usług zdrowotnych.**

W miarę jak zabiegi robotyczne stają się coraz mniej inwazyjne, pacjenci coraz częściej będą mogli poddać się zabiegom chirurgicznym i wrócić do domu tego samego dnia, co eliminuje konieczność przedłużania pobytów w szpitalu. Zmiana ta może zmniejszyć zapotrzebowanie na zasoby szpitalne, zwalniając łóżka dla bardziej krytycznych przypadków i zwiększając ogólną wydolność systemu opieki zdrowotnej.

- **Prewencyjna i wczesna interwencja.** Systemy robotyczne mogą ułatwić prewencję i wczesną interwencję. Na przykład obrazowanie w wysokiej rozdzielczości, diagnostyka trudno dostępnych organów (np. płuc) i zwiększona zręczność narzędzi robotycznych mogą umożliwić wcześniejsze wykrycie i usunięcie tkanki przedrakowej. To proaktywne podejście do opieki zdrowotnej może zapobiec postępowi choroby, zmniejszyć potrzebę agresywnego leczenia i poprawić długoterminowe wyniki leczenia pacjentów.

- **Automatyzacja zbierania i zarządzania danymi.** Gromadzenie szczegółowych danych klinicznych umożliwi ocenę konkretnego zabiegu i jego efektów. Dane te mogą składać się w zbiory wykorzystywane do analiz naukowych, prac badawczych, rozwoju wiedzy medycznej, edukacji i szkoleń lekarzy, oraz postępu technologicznego.

- **Szkolenie wspomagane przez roboty.** Systemy robotyczne będą zapewniać początkującemu personelowi medycznemu realistyczne symulacje, odtwarzające różne scenariusze. Telechirurgia pozwoli doświadczonemu personelowi na mentorowanie i prowadzenie mniej doświadczonych kolegów w czasie rzeczywistym, wspierając rozwój umiejętności i transfer wiedzy. Szkolący się mogą korzystać ze zdalnego doradztwa podczas zabiegów, otrzymując cenne informacje zwrotne i wskazówki od mentorów z innych miejsc. W ostatecznym rozrachunku szkolenie to przyczyni się do stworzenia bardziej wykwalifikowanej i bieżącej kadry oraz skrócenia czasu krzywej uczenia..

2

Aktualny stan wdrożenia rozwiązań robotycznych



2.1. Doświadczenia na wybranych rynkach zagranicznych

• Dania

Dania jest jednym z krajów, gdzie chirurgia robotyczna jest najbardziej rozpowszechniona. Świadczą o tym bardzo wysokie proporcje zastosowań robotycznych w szeregu wybranych procedur medycznych. W ciągu ostatniej dekady zaszła radykalna zmiana w użyciu robotów chirurgicznych³¹.

- » Wśród mężczyzn rak prostaty jest najczęściej występującym nowotworem o rosnącej częstości występowania (w 2020 roku w Danii stwierdzono 4263 nowe przypadki raka prostaty). W omawianym roku w Danii wykonano 1117 prostatektomii. **Tylko trzy (0,3%) operacje radykalnej prostatektomii wykonano metodą chirurgii otwartej, podczas gdy pozostałe wykonano przy asyście robota.**
- » W 2008 r. 98% pacjentek chorych na raka trzonu macicy było operowanych metodą otwartą. W 2015 r. 95% operowano chirurgią małoinwazyjną, z czego 63% przy asyście robota. **Obecnie ponad 90% chorych na raka trzonu macicy ma dostęp do chirurgii małoinwazyjnej, z czego 77% przy pomocy robotów.**
- » Rak nerki jest najczęstszą przyczyną nefrektomii. W 2021 roku w Danii zdiagnozowano 1045 przypadków raka nerkowokomórkowego, a 895 z nich przeszło interwencję operacyjną (operację lub ablację). **W 77% przypadków nefrektomię wykonuje się jako zabieg laparoskopowy z zabiegiem wspomaganym przez robota.** Zastosowanie robotów upowszechniło również częściową nefrektomię (chirurgię oszczędzającą nerkę). Obecnie stanowi ona nieco ponad 50% operacji raka nerki. Właśnie w tym zastosowaniu najlepiej sprawdza się asysta robota.
- » W 2021 r. w Danii zarejestrowano 922 przypadków raka pęcherza moczowego. Cystektomię wykonano u 288 pacjentów (31%). Warunkiem cystektomii jest zlokalizowana choroba i akceptowalny stan ogólny. **Chirurgię z użyciem robota wykonano u 222 pacjentów tj. 77% przypadków cystektomii.**
- » Asysta robotyczna jest coraz częściej stosowana w operacjach ginekologicznych w Danii, głównie w histerektomii. **W latach 2019/2020 22,3% histerektomii w całym kraju wykonano z użyciem robota, podczas gdy w latach 2010/2011 było to ok. 1%.**

• Australia

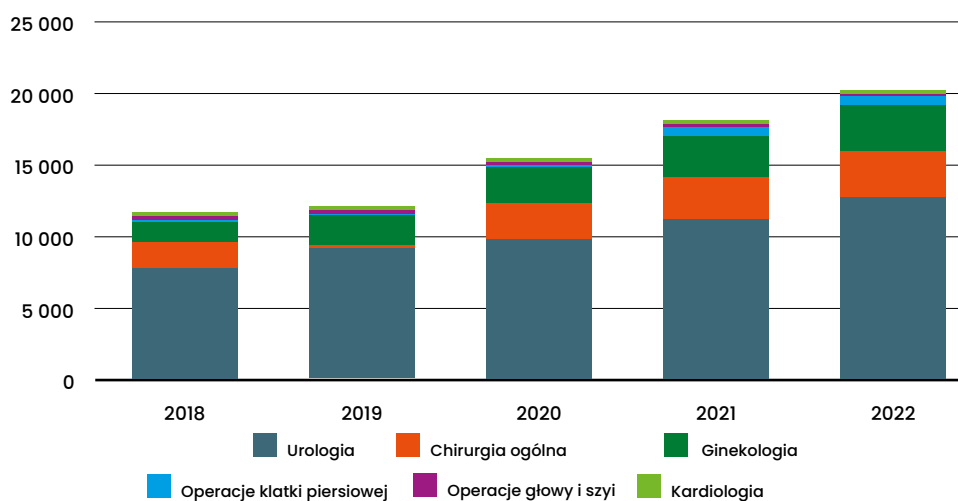
Od czasu wprowadzenia pierwszego robotycznego systemu chirurgicznego do praktyki klinicznej w Australii w 2003 r., nastąpił gwałtowny wzrost popularności platform robotycznych w szerokim zakresie specjalizacji chirurgicznych. **Z kilkudziesięciu zabiegów w 2004 r. nastąpił wzrost liczby zabiegów do ok. 4 000 w 2012 r., i do prawie 20 000 w 2022 r.**

Zastosowanie platform robotycznych różni się w zależności od dyscypliny chirurgicznej. Chirurgia wspomagana robotycznie ugruntowała swoją pozycję szczególnie w dziedzinie urologii, ginekologii i chirurgii kolorektalnej. Najczęściej wykorzystywaną specjalizacją jest urologia (63 proc.), następnie

chirurgia ogólna (17 proc.), ginekologia (15 proc.) oraz chirurgia głowy i szyi, kardiologia i torakochirurgia (łącznie 5 proc.). Największy wzrost w latach 2018-2022 obserwuje się w chirurgii ogólnej, przede wszystkim w zabiegach jelita grubego.

Według stanu na maj 2023 r. w Australii i Nowej Zelandii istnieją 162 platformy robotyczne wykorzystywane w chirurgii. 136 platform znajduje się w szpitalach prywatnych, a 26 w szpitalach publicznych.

Ryc. 3 Liczba procedur w asyście robota chirurgicznego w Australii



Źródło: Royal Australasian College of Surgeons (2023): RACS Robot-Assisted Surgery Working Party Final Report and Recommendations. https://www.surgeons.org/-/media/Project/RACS/surgeons-org/files/Marketing/Robot-Assisted-Surgery-Working-Party-Final-Report-and-Recommendations_June-2023.pdf

• Wielka Brytania

Najnowsze dane z Private Healthcare Information Network (PHIN) – niezależnej firmy non-profit, która gromadzi dane, aby pomóc pacjentom w podejmowaniu bardziej świadomych decyzji – pokazują, że w Wielkiej Brytanii nastąpił istotny wzrost liczby operacji wspomaganych przez roboty³². **W latach 2016–2022 nastąpił ogólny wzrost wykonywanych procedur robotycznych finansowanych przez płatnika publicznego i finansowanych prywatnie o 341%.** W samym sektorze prywatnym wzrost był jeszcze większy i wyniósł 928%.

W 2022 roku przeprowadzono 49 000 zabiegów z użyciem robota, w porównaniu do 11 000 w 2016 roku. Do końca 2022 r. w skali kraju chirurgia wspomagana robotem była najczęściej stosowana w zabiegach związanych z prostatą. Na drugim miejscu, z ponad trzykrotnie niższą liczbą zabiegów, znalazły się operacje węzłów chłonnych miednicy mniejszej. W tym samym okresie, w sektorze prywatnym, zabiegi chirurgiczne mające na celu przywrócenie funkcji stawu (np. kolana lub biodra) były najpopularniejszym zabiegiem wspomagany robotem (3,7 tys. zabiegów).

• USA

Wykorzystanie chirurgii robotycznej w USA jest najwyższe spośród wszystkich krajów świata. Roczna liczba wykonanych robotycznie procedur sięga prawie 900 tysięcy³³. W Stanach Zjednoczonych 85% prostatektomii i 50% histerektomii wykonuje się za pomocą robota³⁴. Dynamiczny wzrost obserwowany jest od wielu lat, z wyłączeniem okresu pandemii COVID-19. W 2020 r. liczba procedur chirurgii robotycznej spadła o niespełna 1% podczas gdy rok wcześniej wzrosła o ok. 17% r/r.

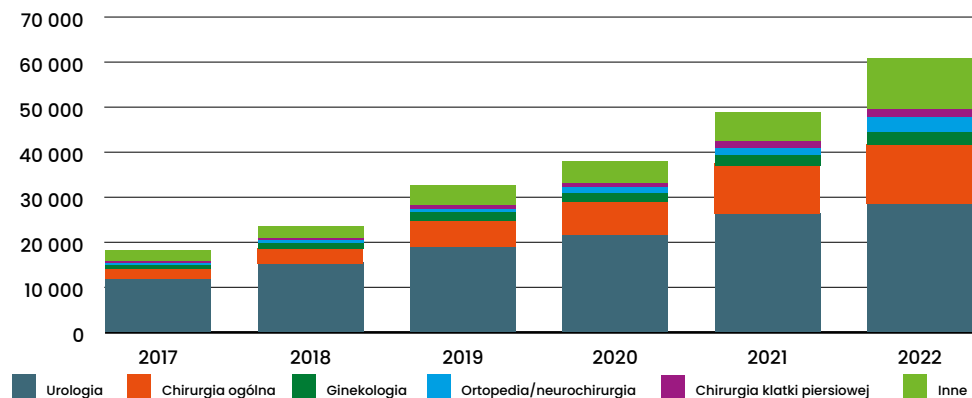
Co ciekawe, roboty chirurgiczne upowszechniły się w USA do tego stopnia, że wykorzystywane są już nie tylko w przypadkach operacji planowych, ale również nagłych³⁵. Chirurgia ogólna w nagłych wypadkach przy asyście robota odpowiada obecnie za istotną część wszystkich przypadków zastosowania chirurgii małoinwazyjnej w nagłych wypadkach. Dotyczy to w szczególności **resekcji jelita grubego, gdzie udział technologii robotycznych w 2008 r. wynosił 5,5%, zaś w 2020 r. już 21,1%. i perforowanych operacji owrzodzeń z proporcją zastosowań asysty robota w 2016 r. na poziomie 7,8% i 19,5% w 2020 r.**

• Niemcy

W 2006 r. w Niemczech wykonano około 1000 operacji robotycznych w asyście robota. W 2022 r. było ich 60 razy więcej. Większość przypadków zastosowań robota chirurgicznego w badanym okresie dotyczyła urologii, a więc przede wszystkim prostatektomii. Natomiast odsetek urologicznych operacji robotycznych spadł z ok. 68% w 2017 r. do ok. 48% w 2022 r. Spadek ten wynika, nie z ograniczenia ilości tego typu operacji, ale jeszcze szybszego wzrostu innych rodzajów operacji robotycznych. Wzrost ten dotyczy w szczególności operacji chirurgii ogólnej (z 11,7% do 21,3%), ortopedii/neurochirurgii (z 2,7% do 5,2%) oraz innych operacji robotycznych (wzrost z 11,8% do 18,2%).

Liczba szpitali wyposażonych w jakikolwiek system robotyczny rośnie od 2017 roku o około 19% rocznie – od niespełna 100 szpitali w 2017 r. do 226 szpitali w 2022 r. (w tym 193 posiada złożony systemem robotyki chirurgicznej).

Ryc. 4 Liczba operacji robotycznych w Niemczech



Źródło: opracowanie własne na podstawie danych DRG-Statistik (Operationen und Prozeduren an vollstationären Patienten: Deutschland, Jahre, Operationen und Prozeduren (1-4-Steller Hierarchie) oraz Von S. Saueremann, S. Müller, S. Habetha, M. Mohr und T. Bschiepfer (2023): Robotisch-assistierte Operationen in Deutschland Eine aktuelle Übersicht anhand der kodierten OPS-Kodes. https://www.healthcareheads.com/fileadmin/user_upload/downloads/2023_KU_Gesundheitsmanagement_Saueremann_etal_Robotisch_assistierte_Operationen_Deutschland_1_3.pdf

2.2. Rozwiązania systemowe na rzecz zastosowań robotycznych w ochronie zdrowia

Podstawową koncepcją, przez pryzmat której powinniśmy oceniać zastosowanie robotów medycznych, jest opieka zdrowotna oparta na wartości (ang. *Value Based Healthcare*). Według tej koncepcji wartość usług medycznych powinna być oceniana jako relacja wyników zdrowotnych istotnych dla pacjenta do kosztów uzyskania tego wyniku. Założeniem tej koncepcji, w przeciwieństwie do tradycyjnego modelu opieki zdrowotnej, jest wynagradzanie świadczeniodawców usług zdrowotnych za uzyskanie u pacjenta określonego efektu zdrowotnego przy określonych kosztach. Innymi słowy, nagradzanie działań zmierzających do wyleczenia pacjentów, a nie samego leczenia.

Jeśli chodzi o pozytywną relację wyników do kosztów, robotyka medyczna już obecnie wykazuje przewagę nad metodami standardowymi w różnych warunkach opieki, zaś jej potencjał nie jest jeszcze wyczerpany. Wykorzystanie robotów w opiece zdrowotnej ma najobszerniejszą historię w warunkach szpitalnych, gdzie wykazały one swoją skuteczność, poprawiając wyniki w wybranych procedurach. Te korzyści są także coraz częściej obserwowane nie tylko w placówkach stacjonarnych, ale także ambulatoryjnych i rehabilitacyjnych. W duchu koncepcji opieki zdrowotnej opartej na wartości pozytywnym efektem zastosowań robotycznych jest nie tylko poprawa wyników klinicznych, ale także ograniczenie kosztów m.in. w postaci skrócenia czasu trwania zabiegów lub zmniejszenia zapotrzebowania na siłę roboczą przy ich wykonywaniu.

Mit: „Wykorzystanie robotów się nie opłaca (jest zbyt drogie)”

Prawda: Analizy pokazują, że choć koszt samej procedury robotycznej może być wyższy, korzyści w wybranych zastosowaniach są znaczące. Istnieją różne rodzaje analiz potwierdzające opłacalność ekonomiczną interwencji medycznych. Jedną z podstawowych z nich jest analiza efektywności kosztowej, którą zwykle mierzy się kosztem uzyskania dodatkowego roku życia pacjenta skorygowanego o jego jakość. Tego typu analizy bierze pod uwagę m.in. Agencja Oceny Technologii Medycznych i Taryfikacji m.in. dopuszczając technologię medyczną do refundacji. Zestawienie³⁶ tego typu badań stwierdza, że 27 z 33 z nich (82%) uznaje, że operacje w asyście robota są (lub pod pewnymi warunkami mogą być) efektywne kosztowo.

Należy podkreślić, że chociaż uzyskanie dodatkowego roku życia pacjenta skorygowanego o jego jakość przy pomocy operacji robotycznej wymaga pewnych nakładów, przynosi ono wiele pożytków. Przede wszystkim są to widoczne w długim terminie korzyści w postaci ograniczenia kosztów pośrednich m.in. z tytułu opieki socjalnej, szybszego powrotu do aktywności zawodowej, czy też konieczności dostarczenia kolejnych świadczeń opieki zdrowotnej. Oczywiście potwierdzenie opłacalności powinno mieć miejsce w konkretnych warunkach stosowania rozwiązań robotycznych, przy uwzględnieniu chociażby wycen płatnika publicznego, kosztów ubezpieczeń społecznych itd. Jednak już dziś obszerna literatura naukowa sugeruje, że wiele z procedur robotycznych może być uznane za opłacalne.

Niestety większość obecnych publicznych systemów ochrony zdrowia opiera się na płatności za usługę zdrowotną, a nie osiągnięte korzyści. Niemniej, biorąc pod uwagę licznie potwierdzone naukowo korzyści, w wielu systemach płatności publicznych za usługi zdrowotne, stosowane są rozwiązania upowszechniające użycie robotów medycznych. Poniżej znajdują się przykłady w jaki sposób wsparcie użycia robotów medycznych ma miejsce w opiece szpitalnej w różnych krajach świata, gdzie zastosowania robotyczne są najbardziej upowszechnione.

»WSPÓLNE ZAKUPY ROBOTÓW MEDYCZNYCH NA POZIOMIE PŁATNIKA PUBLICZNEGO W WIELKIEJ BRYTANII

Brytyjski płatnik publiczny – National Health Service (NHS), wprowadził program ramowy wsparcia wdrażania robotyki chirurgicznej o nazwie „*Robotic Medical Equipment and Associated Accessories*”³⁷. Ramy finansowania zapewniają zgodną z przepisami ścieżkę zakupu zrobotyzowanego sprzętu medycznego/chirurgicznego. Jest to jedyna droga dostępu do Funduszu Kapitałowego Sprzętu Departamentu Zdrowia i Opieki Społecznej dla produktów robotycznych. Ramy obejmują trzy grupy: roboty chirurgiczne, roboty kręgosłupowe i neurologiczne oraz wolnostojące ramiona robotyczne. Wspierane jest finansowanie robotów wykorzystywanych w dwóch warunkach chirurgicznych: chirurgii małoinwazyjnej, chirurgii kręgosłupa/neurologicznej.

Oszczędności wynikające z zakupu systemów robotyki medycznej osiągane są dzięki grupowaniu wolumenów, oraz długookresowym zobowiązaniom Departamentu Zdrowia i Opieki Społecznej (DHSC). Urządzenia są dostępne w ramach dostawy bezpośredniej, a czas realizacji wynosi od 12 do 16 tygodni od daty zamówienia. Aby złożyć zamówienie, podmiot zdrowotny musi uzyskać wycenę za pośrednictwem NHS Supply Chain, aby skorzystać z cennika krajowej umowy ramowej.

»WYODRĘBNIENIE RÓŻNYCH ZASTOSOWAŃ ROBOTYCZNYCH W NIEMIECKIM SYSTEMIE SPRAWOZDAWCZYM

Wraz z wprowadzeniem systemu G-DRG w Niemczech (2004) koszty leczenia szpitalnego są zwracane podmiotom opieki zdrowotnej w oparciu o stawki ryczałtowe za każdy przypadek, określone za pomocą identyfikatorów usług (np. kodów ICD-10 i OPS – Operationen – und Prozedurenschlüssel). Do 2015 r. włącznie obowiązywał kod OPS 5-987 „*Zastosowanie robota chirurgicznego*”. Z biegiem czasu, kod został zróżnicowany, dzięki czemu dostępne są teraz odrębne kody OPS dla różnych technologii robotycznych.

W 2016 r. wprowadzono kod 5-987.0 do kodowania użycia złożonego robota chirurgicznego takiego jak Da Vinci, Versius, Senhance, czy Hugo. Użycie innych zrobotyzowanych systemów chirurgicznych zostało następnie zakodowane kodem OPS 5-987.x. Operacje z użyciem ramienia robota (o co najmniej sześciu stopniach swobody) zostały wyodrębnione z tej puli w 2018 r. pod kodem OPS 5-987.1. Natomiast użycie miniaturowego robota zakodowano od 2021 r. jako OPS 5-987.2. W ten sposób wyróżniono różne rodzaje robotów medycznych, które często nie są zauważane w kontekście największej popularności złożonych systemów robotycznych. Toruje to drogę do odpowiedniej, dostosowanej wyceny świadczeń w oparciu o rodzaj wykorzystywanych technologii.

»CHIRURGIA MAŁOINWAZYJNA W USA TO CHIRURGIA ROBOTYCZNA

W Stanach Zjednoczonych ubezpieczenie, które obejmuje chirurgię małoinwazyjną, zazwyczaj obejmuje chirurgię robotyczną. Dotyczy to szeroko rozposzechnionych planów ubezpieczeniowych, takich jak Medicare (Medicare to federalny program ubezpieczenia zdrowotnego w Stanach Zjednoczonych dla osób w wieku 65 lat lub starszych oraz młodszych osób niepełnosprawnych; w 2022 r. obejmował 65 milionów obywateli). Ważne, aby pamiętać, że zakres ubezpieczenia będzie zależał od planu i pakietu świadczeń.

Chociaż istnieje uzupełniający kod Current Procedural Terminology (CPT®) dla technik chirurgicznych wymagających użycia systemów robotycznych (kod CPT S2900), techniki te są uważane za część małoinwazyjnej procedury podstawowej³⁸. Chociaż nie ma w tym wypadku preferencji finansowych w stosowaniu robotów chirurgicznych, obecny standard kliniczny i odpowiedni poziom finansowania sprawia, że procedury te są często wybierane zamiast operacji laparoskopowych.

»PACJENCI SAMI DECYDUJĄ SIĘ NA OPERACJE ROBOTYCZNE W JAPONII, NAWET GDY WIĄŻE SIĘ TO Z ICH WSPÓLFINANSOWANIEM

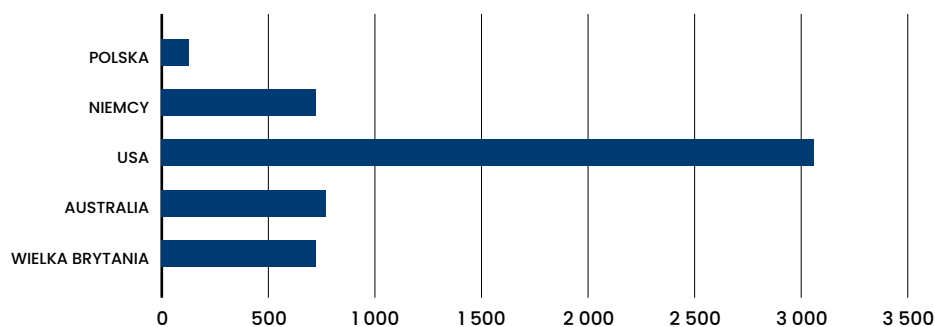
W ostatnich latach zabiegi zrobotyzowane zyskały dużą popularność w Japonii. Jest to możliwe w wyniku zmiany, która została wprowadzona już w 2009 r. Do tej pory mieszany system płatności, w którym pacjenci otrzymują jednocześnie publiczne ubezpieczenie zdrowotne i dopłacają do leczenia ze środków własnych nie był w ogóle dozwolony. Jednak od 2009 r. leczenie zatwierdzone jako zaawansowane leczenie medyczne może być finansowane przy współudziale pacjenta. Biorąc pod uwagę rozwój chirurgii robotycznej w Japonii, pacjenci często decydują się na dopłatę by mieć dostęp do lepszej jakości usług zdrowotnych.

Obecnie podmioty regulacyjne w Japonii dopuszczają finansowanie publiczne procedur przy wykorzystaniu autoryzowanych robotów, aż w 46 procedurach³⁹. Procedury te obejmują operacje przewodu pokarmowego, klatki piersiowej, serca, urologię oraz ginekologię.

2.3. Porównanie stanu wdrażania robotyki medycznej w Polsce i na świecie

Liczba operacji robotycznych w relacji do populacji w Polsce na tle wybranych krajów świata świadczy o pewnym opóźnieniu we wdrażaniu tego typu technologii w naszym kraju. W 2022 r. liczba tego typu operacji na milion mieszkańców była ponad pięciokrotnie niższa niż w Niemczech, Wielkiej Brytanii czy Australii, natomiast aż dwudziestokrotnie niższa niż w USA – lidera operacji robotycznych na świecie.

Ryc. 5 Liczba operacji robotycznych na mln mieszkańców w 2022 r. w wybranych krajach świata.



Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z rozdziału 2.2, raportu Modern Health Institute (2023). Chirurgia robotowa oraz danych krajowych urzędów statystycznych nt. populacji.

Chociaż dane te mogą wydać się niepokojące, należy wziąć pod uwagę różnice w rozwoju społeczno-gospodarczym pomiędzy Polską, a porównywanymi krajami. Należy zwrócić również uwagę na dynamikę liczby przeprowadzanych operacji robotycznych, która w Polsce jest wyższa niż w porównywanych krajach. Przykładowo, w okresie 2018-2022 liczba operacji robotycznych w Polsce rosła w tempie ponad 55% rocznie, natomiast w Niemczech było to poniżej 23% rocznie.

Kontynuacja tej dynamiki nie jest jednak sprawą oczywistą. Świadczy o tym chociażby prezentowana poniżej historia rozwoju robotyki medycznej w Polsce, ze szczególnym uwzględnieniem sektora publicznego. W celu osiągnięcia poziomu dostępności pacjentów do rozwiązań robotycznych porównywalnego do krajów zachodnich konieczne jest kontynuowanie i poszerzenie publicznego systemu wsparcia rozwiązań robotycznych.

2.4. Dotychczasowy stan wdrażania robotyki medycznej w polskim publicznym systemie opieki zdrowotnej

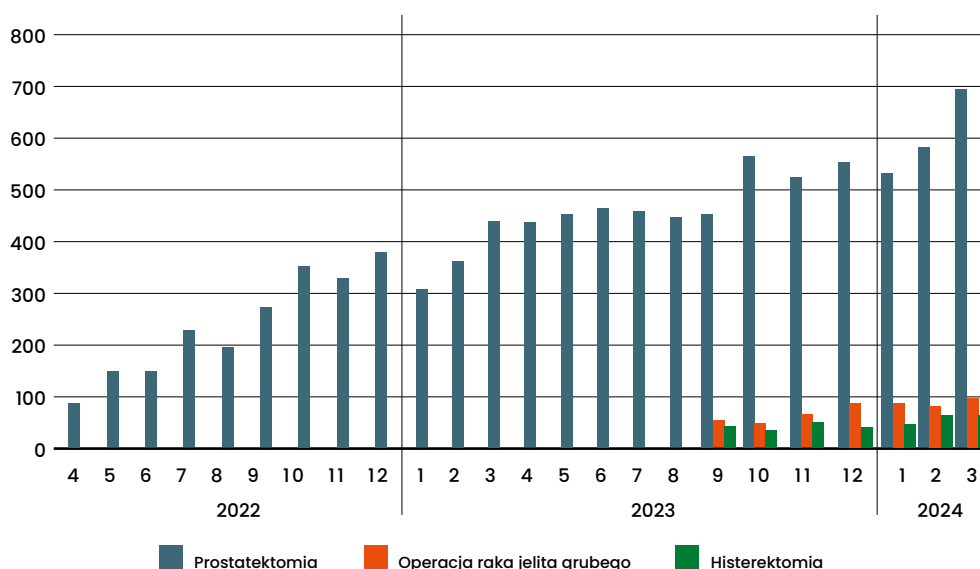
Wykorzystanie robotów medycznych w Polsce, podobnie jak w innych krajach, rozpoczęło się przede wszystkim od zastosowania robotów chirurgicznych. Na koniec 2010 r. w Wojewódzkim Szpitalu Specjalistycznym – Ośrodku Badawczo-Rozwojowym we Wrocławiu rozpoczął pracę pierwszy złożony system chirurgii robotycznej. Od tego czasu na polskim rynku zaszły niebagatelne zmiany.

Po rozpoczęciu wykonywania operacji w asyście robota chirurgicznego w 2016 r. przez kolejny publiczny szpital, nastąpił znaczący rozwój chirurgii robotycznej w szpitalach prywatnych. Skupiły się one przede wszystkim na radykalnej prostatektomii, w znacznie mniejszym stopniu na operacjach nowotworów ginekologicznych i przewodu pokarmowego⁴⁰. W rezultacie w 2019 r. miało w Polsce miejsce niespełna 1300 operacji w asyście robota chirurgicznego, spośród których prawie 71% stanowiły operacje w sektorze prywatnym. W omawianym roku 93,6% operacji robotycznych wykonywanych w sektorze prywatnym stanowiły prostatektomie.

Po roku 2019 nastąpił dalszy wzrost liczby operacji robotycznych w sektorze prywatnym, ale jeszcze większą dynamikę operacji wspomaganych robotycznie charakteryzował się sektor publiczny. Pod nieobecność odrębnej wyceny operacji robotycznych szpitale finansowane publicznie rozliczały tego typu zabiegi jako laparoskopowe.

W kwietniu 2022 r. wprowadzono odrębną wycenę płatnika publicznego dla radykalnej prostatektomii wykonywanej w asyście robota. To znacząco odmieniło kształt rynku operacji robotycznych w Polsce w zdecydowanie najpowszechniejszym obszarze wykorzystywania robotów medycznych. Wprowadzenie odrębnej wyceny NFZ operacji robotycznych było bodźcem finansowym do korzystania z usług podmiotów posiadających kontrakty z płatnikiem publicznym. W rezultacie liczba radykalnych prostatektomii w 2023 r. przekroczyła 6000 operacji, z czego prawie 90% z nich było wykonywanych w sektorze publicznym. We wrześniu 2023 r. wprowadzono odrębną wycenę kolejnych dwóch zabiegów robotycznych – leczenia chirurgicznego raka macicy i raka jelita grubego.

Ryc. 6 Liczba procedur robotycznych rozliczanych z NFZ za pomocą odrębnych wycen robotycznych.



Źródło: Narodowy Fundusz Zdrowia.

Mit: „Zakupione już przez szpitale w Polsce roboty stoją i nie pracują”

Prawda: Roboty medyczne w Polsce są wykorzystywane w coraz większym stopniu i brak jest informacji o urządzeniach, które w ogóle nie są używane. Przykładowo, dla operacji robotycznych w 2023 r. średnia liczba zabiegów na ośrodek wyniosła ponad 170⁴¹. Innymi słowy w ośrodkach, w których wykorzystywane są roboty zabiegi robotyczne przeprowadzane były średnio co 2 dni. Należy podkreślić, że jest to średnia dla wszystkich ośrodków w Polsce posiadających chociaż jednego robota chirurgicznego, podczas gdy co najmniej kilkanaście szpitali w Polsce przeprowadza co najmniej 1 operację robotyczną dziennie. Wraz z popularyzacją technologii, oraz nabywaniem doświadczenia i umiejętności przez personel medyczny spodziewany jest dalszy wzrost wykorzystania zainstalowanych robotów medycznych.

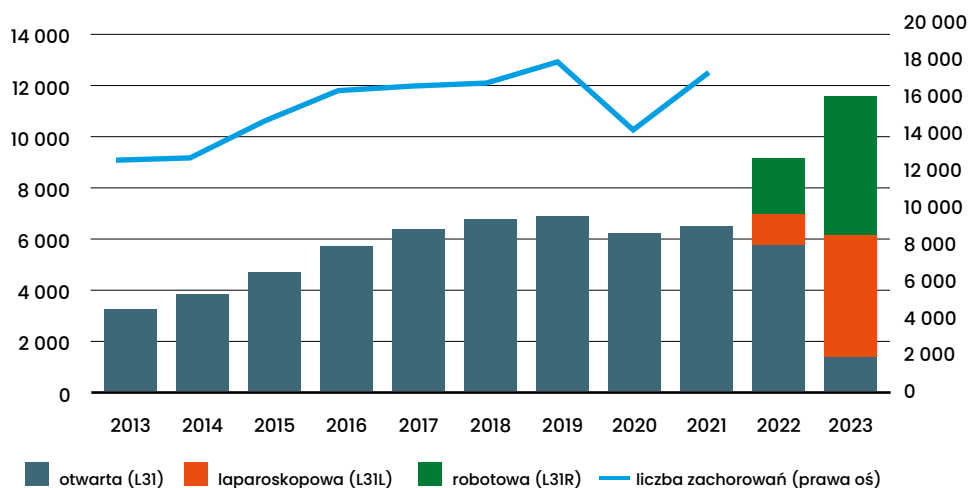
Na pierwszy rzut oka tak wysoki wzrost liczby robotycznych prostatektomii wydaje się być zastanawiający. W pierwszym półroczu od wprowadzenia indywidualnych wycen trzech omawianych procedur liczba prostatektomii robotycznych zwiększyła się czterokrotnie, podczas gdy liczba operacji raka jelita grubego i macicy wzrosła odpowiednio o 80% i 50%. Tak wielka popularność finansowania publicznego operacji robotycznych prostatektomii nie była spodziewana. Nastąpiło przekroczenie budżetu zakładanego przez Narodowy Fundusz Zdrowia na refundację operacji robotycznych prostatektomii wynikające z niedoszacowania popytu na tą usługę. W 2023 r. wydano na ten cel łącznie ponad 168 mln zł.

Jednak gdy spojrzymy w perspektywie długookresowej na kształtowanie się popytu na te świadczenia zdrowotne, wzrost zapotrzebowania na poszczególne usługi zdrowotne okaże się zgodny z wieloletnimi trendami. W przypadku prostatektomii widoczny jest długoletni trend wzrostu liczby procedur rozliczanych przez NFZ wynikający z rosnącej liczby zachorowań, a także z rosnącego odsetka chorych leczonych operacyjnie. Warto zaznaczyć, że podobne zmiany obserwowano również w innych krajach⁴².

Trend ten był zaburzony przez pandemię COVID-19, kiedy to spadła zarówno liczba zdiagnozowanych zachorowań, jak i liczba operacji prostatektomii. Wyjątkowo wysokie wzrosty liczby prostatektomii w 2022 i 2023 r. mogły być po części efektem odbudowywania długu zdrowotnego z poprzednich lat, także w postaci wzrostu liczby zdiagnozowanych nowotworów prostaty. Dodatkowo zaszła migracja pacjentów chcących poddać się prostatektomii z sektora prywatnego do publicznego.

Należy podkreślić, że w I kw. 2024 r. proporcja operacji robotycznych do wszystkich prostatektomii finansowanych przez płatnika publicznego w Polsce osiągnęła ok. 56,0%, podczas gdy w krajach zachodnich proporcja ta sięga ponad 90%. Biorąc ten fakt pod uwagę, a także spodziewaną kontynuację trendu wzrostu zdiagnozowanych nowotworów prostaty, należy spodziewać się, że liczba prostatektomii robotycznych w kolejnych latach będzie nadal dynamicznie rosta.

Ryc. 7 Liczba procedur prostatektomii radykalnej rozliczanych przez NFZ oraz liczba zachorowań na raka prostaty w Polsce

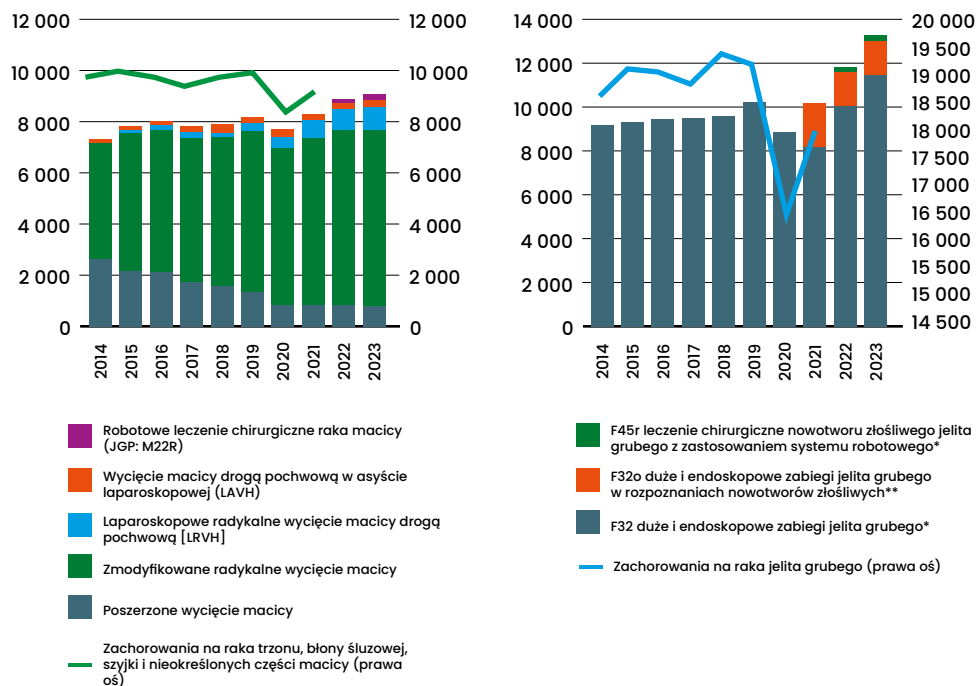


Źródło: opracowanie własne na podstawie danych NFZ i onkologia.org.pl

W przypadku operacji robotycznych jelita grubego oraz macicy sytuacja jest odmienna. Po pierwsze zachorowalność na te dwa typy nowotworów w ostatnich latach nie ulegała wzrostowi, ale była stosunkowo stabilna, pomijając okres pandemii COVID-19. Dodatkowo, proporcja nowotworów zdiagnozowanych leczonych chirurgicznie pozostaje stabilna. Obecnie, tak jak w przypadku prostatektomii, widać pewne odbicie w przypadku zdiagnozowanych nowotworów, oraz przeprowadzanych operacji, która zapewne wynika z odpracowania długu zdrowotnego zaciągniętego podczas pandemii COVID-19.

Po drugie, operacje robotyczne tych dwóch typów nowotworów stanowiły zdecydowaną mniejszość procedur robotycznych wykonywanych w Polsce, w porównaniu do dominującej prostatektomii. Adopcja technologii robotycznych w tych procedurach rozliczanych z NFZ wymaga więc odpowiednio więcej czasu. Mimo wszystko, wzorem krajów zachodnich, w przyszłości należy się spodziewać upowszechnienia operacji robotycznych w leczeniu tych dwóch nowotworów, kosztem technik standardowych.

Ryc. 8 Liczba zabiegów oraz zachorowalność na raka macicy i jelita grubego w Polsce



Źródło: opracowanie własne na podstawie danych NFZ i onkologia.org.pl

Wraz ze wzrostem liczby odrębnie wycenianych operacji robotycznych finansowanych publicznie następuje wzrost liczby podmiotów je oferujących. Radykalną prostatektomię robotyczną w marcu 2024 r. oferowało już 37 ośrodków w kraju, leczenie chirurgiczne raka jelita grubego 20 ośrodków, zaś raka macicy 14 podmiotów. Oczywiście łączy się to ze zwiększonymi zakupami złożonych systemów robotycznych w Polsce.

Mit: „W Polsce jest mało wykwalifikowanych operatorów robotów, a oferowane przez firmy szkolenia są niestandardyzowane/niewystarczające i nie dają gwarancji wysokiej jakości nauczania”

Prawda: Szkolenia operatorów robotów w Polsce są ściśle powiązane z zakupem urządzeń. Po finalizacji umowy sprzedaży, producent zapewnia kompleksowe, wieloetapowe szkolenie, zwieńczone uzyskaniem przez operatora umiejętności pozwalających na samodzielne przeprowadzenie zabiegu. Często producenci oferują usystematyzowany pakiet szkoleń zakończony uzyskaniem certyfikatu niezależności operatora. Innymi słowy, z założenia korzystanie z robota operacyjnego jest możliwe tylko przez wykwalifikowany personel.

Dodatkowo warto podkreślić, że według wielu analiz efekty szkolenia obsługi robotów medycznych są szybciej widoczne niż w przypadku standardowych technik małoinwazyjnych. Przykładowo, według jednego z badań już 6-godzinne szkolenie stażysty chirurga skutkowało ponad trzykrotnie niższą liczbą błędów w przypadku symulowanego zabiegu robotycznego w porównaniu do zabiegu laparoskopowego^{43,44}.

3

Obszary wykorzystania rozwiązań robotycznych w ochronie zdrowia o największym potencjale i korzyściach

W toku dyskusji z ekspertami oraz przeglądu literatury zidentyfikowano siedem podstawowych obszarów, które prezentują największe korzyści zastosowań robotycznych. Jest to zestawienie procedur, których indywidualna wycena dla zabiegów robotycznych mogłaby poprawić dostępność pacjentów do usług zdrowotnych najwyższej jakości.

Nie oznacza to, że zastosowania robotów medycznych w innych obszarach, np. robotów dezynfekcyjnych, transportowych czy aptecznych nie powinny być promowane. Natomiast skupienie się na zabiegach chirurgicznych powodowana jest możliwością skalowania istniejących już rozwiązań.

3.1. Chirurgia miękka: zabiegi wątroby

Minimalnie inwazyjna chirurgia wątroby zapewnia mniejszą zachorowalność i śmiertelność pacjentów w porównaniu z procedurami otwartymi⁴⁵. Obecnie jest jasne, że główne resekcje wątroby, mogą być wykonywane minimalnie inwazyjnie⁴⁶. Za tymi faktami zaleca się stosowanie zabiegów laparoskopowych jako standardu leczenia w przypadku wybranych resekcji wątroby, takich jak usunięcie lewego boczego segmentu wątroby. Problem polega na tym, że istnieje wysoka krzywa uczenia się dla wykonywania zabiegów laparoskopowych na wątrobie. Chirurgi muszą być odpowiednio przeszkoleni. Wymaga to dedykowanego personelu medycznego i ośrodków o dużym natężeniu tego typu operacji.

Platforma robotyczna oferuje pewne innowacje, które mogą ułatwić operacje małoinwazyjne. Manewry ramionami robota są łatwiejsze w porównaniu ze standardową laparoskopią, co może wyłuszczyć krzywą uczenia. Chodzi tutaj zwłaszcza o większą liczbę stopni swobody oferowaną przez roboty chirurgiczne. Przy ich użyciu szycie i rozwarstwianie naczyń staje się łatwiejsze i bardziej precyzyjne. Sterowanie trzema narzędziami i kamerą przez chirurga przy konsoli zapewnia doskonałą kontrolę nad miejscem operacji. Jest to szczególnie pomocne w nagłych sytuacjach, takich jak nieoczekiwane krwawienie. Co więcej, robot sprawia, że chirurgia małoinwazyjna jest mniej męcząca w porównaniu z konwencjonalną laparoskopią⁴⁶. Ergonomiczna pozycja chirurga przy konsoli pozwala na ograniczenie efektów zmęczenia, które bywają widoczne podczas zabiegów laparoskopowych.

3.2. Chirurgia miękka: częściowa nefrektomia

Częściowa nefrektomia jest powszechnie akceptowana jako standardowa terapia zlokalizowanych guzów nerki. Laparoskopowa nefrektomia częściowa jest małoinwazyjną metodą wykorzystywaną w takich przypadkach. Jednak do precyzyjnej resekcji i szycia związanego z zabiegiem w ograniczonym czasie niedokrwionym wymagane są zaawansowane umiejętności.

Ponadto zabiegi laparoskopowe są skomplikowane, a ich trudność zależy od lokalizacji guza, takiego jak zatoka nerkowa. Pod tym względem wykorzystanie robota operacyjnego jest bardzo atrakcyjne ze względu na swobodny ruch w widoku trójwymiarowym.

W ostatnich latach rozwój chirurgii małoinwazyjnej sprawił, że częściowa nefrektomia wspomagana robotem stała się bezpieczną techniką, która skróciła czas ciepłego niedokrwienia i skróciła czas zabiegu w porównaniu z podejściem laparoskopowym⁴⁷. Wydaje się również, że procedura robotyczna poprawia kontrolę onkologiczną, ergonomię chirurga i swobodę ruchów bez zwiększania powikłań, pogarszania stanu lub przedłużającej się rekonwalescencji pooperacyjnej⁴⁸. Biorąc te korzyści pod uwagę, również w kontekście potrzeby wysokich umiejętności chirurga w celu przeprowadzenia operacji laparoskopowej, wydaje się, że zastosowanie robota może przyczynić się do upowszechnienia częściowej nefrektomii, z korzyścią dla pacjenta.

3.3. Chirurgia miękka: chirurgia raka płuca

Chirurdzy mogą wykorzystywać technologię robotyczną do trzech rodzajów operacji raka płuca. Należą do nich:

- » Lobektomia: Termin ten odnosi się do usunięcia całego dotkniętego płata płuca.
- » Resekcja klinowa: Ta procedura polega na usunięciu guza wraz z otaczającym go małym klinem zdrowej tkanki płucnej.
- » Segmentacja: W tej procedurze chirurg usuwa więcej tkanki niż podczas resekcji klinowej, ale mniej tkanki niż w przypadku lobektomii.

Badania porównujące wyniki osób z drobnokomórkowym rakiem płuca po trzech rodzajach operacji wykazały związek między lobektomią a wyższymi wskaźnikami przeżycia⁴⁹. W porównaniu efektów lobektomii robotycznej z efektami lobektomii otwartą stwierdzono, że chirurgia wspomagana przez roboty doprowadziła do zmniejszenia liczby powikłań i skrócenia pobytu w szpitalu⁵⁰.

Oprócz korzyści w porównaniu z operacją na otwartej klatce piersiowej, chirurgia wspomagana robotem może mieć pewne zalety w porównaniu z lobektomią torakoskopową. Lobektomia robotyczna i torakoskopowa wiązała się z korzystnymi wynikami okołoperacyjnymi w porównaniu z operacją otwartą⁵¹. Lobektomia wspomagana przez robota wiązała się również ze skróceniem czasu pobytu i zmniejszonym współczynnikiem konwersji w porównaniu z lobektomią torakoskopową.

3.4. Chirurgia kręgosłupa

Implanty szeroko stosowane w większości operacji kręgosłupa, pomagają ustabilizować kręgosłup i ułatwiają zespolenie, ale literatura pokazuje, że wskaźniki powikłań związanych z ich implantacją nie są bez znaczenia⁵². Dlatego pragnienie poprawy dokładności i zmniejszenia liczby powikłań doprowadziło do rozwoju nawigacji komputerowej i chirurgii wspomagananej przez roboty. Wiele doniesień o chirurgii kręgosłupa wspomagananej przez roboty pokazuje, że metody te oferują dokładność umieszczania implantów lepszą niż umieszczanie z wolnej ręki wspomaganane fluoroskopią⁵³.

Obecnie istnieje szereg robotów usprawniających wszczepienie implantów. Niektóre z nich korzystają ze sztucznej inteligencji w celu analizy mechaniki kręgosłupa pacjenta, tak aby wesprzeć jego naturalny ruch w rzeczywistych warunkach. W efekcie uzyskiwane są zdecydowanie niższe współczynniki rewizji, nawet jedenastokrotnie niższe niż w przypadku zabiegów wspomaganych fluoroskopią⁵⁴. Tego typu roboty umożliwiają trójwymiarowe mapowanie kręgosłupa czy integrację z nawigacją opartą na obrazach przedoperacyjnych, które znacząco zwiększają precyzję operacji oraz pozwalają unikać krytycznych struktur anatomicznych, takich jak nerwy i naczynia krwionośne.

Robotycznie wspomaganie operacje kręgosłupa są związane z mniejszą śródoperacyjną utratą krwi i krótszą hospitalizacją⁵⁵. Większość tego typu operacji to chirurgia małoinwazyjna o mniejszych wielkościach nacięcia, unikająca oderwania przyczepów mięśniowych, co przyczynia się do zmniejszenia bólu pooperacyjnego i krótszych pobytów w szpitalu⁵⁶. W jednym przeglądzie literatury ogólny wskaźnik powikłań robotycznych operacji kręgosłupa wyniósł 4,83%, a wskaźnik powikłań związanych ze śrubą wynosił 2,92%, który był znacznie niższy niż w grupie tradycyjnej chirurgii⁵⁷. Zastosowanie robotów może również zmniejszyć narażenie na promieniowanie zarówno pacjentów, jak i personelu medycznego poprzez minimalne użycie fluoroskopii, a także umożliwić wygodniejszą i mniej obciążającą pozycję chirurga w czasie długich i skomplikowanych operacji.

Innego rodzaju wsparcie operacji kręgosłupa stanowią egzoskopy a więc połączenie ramienia robotycznego z mikroskopem. Wspomagają one operatora w wizualizacji pola operacyjnego, umożliwiają wykonywanie automatycznych, programowalnych ruchów. Niedawna metaanaliza⁵⁸ potwierdza, że pod względem jakości obrazu, oświetlenia, zakresu dynamicznego, percepcji głębi, ergonomii i opłacalności, egzoskop był konsekwentnie oceniany jako lepszy od mikroskopu przy krótszej krzywej uczenia.

3.5. Endoprotezoplastyka stawu kolanowego

Wymiana stawu kolanowego jest jednym z pierwszych zabiegów chirurgicznych w ortopedii, który może korzystać z zastosowania systemów robotycznych w celu zapewnienia bardziej precyzyjnego przycięcia kości i jeszcze dokładniejszego pozycjonowania implantu, poprawiając w ten sposób wyniki pacjenta.

Przewaga technologii robotycznych polega głównie na umożliwieniu operatorowi wykonania precyzyjnych przycięć kości udowej oraz piszczelowej w oparciu o zebrane punkty anatomiczne pacjenta. Powtarzalność, precyzja, dokładność przycięcia oraz pozycjonowania implantu jest zachowana dla każdego pacjenta, w oparciu o jego indywidualne uwarunkowania anatomiczne kości, tkanek miękkich oraz osi kończyny, co nie pozostaje bez wpływu na poprawę komfortu pracy chirurga oraz mniejsze ryzyko ewentualnego błędu. To z kolei zmniejsza ryzyko powikłań i ogranicza konieczność ewentualnych zabiegów rewizyjnych w przyszłości. Chirurgia robotyczna jest dokładniejsza niż tradycyjne operacje tego typu ze względu na poziom precyzji, jaki oferuje, znacząco wykraczający poza naturalne możliwości ludzkiego oka. Pozwala to personelowi medycznemu na lepsze umiejscowienie implantu, osiowania kończyny i napięcia tkanek miękkich. Chirurgia wspomagana robotem to krótsze pobyty pacjentów w szpitalu, a w związku z tym mniejsze ryzyko infekcji i szybszy powrót do zdrowia. Są to operacje, które wymagają wysokiej precyzji w zaopatrzenie deficytów chrząstki w stawie oraz ograniczenia ingerencji chirurgicznej w prawidłowo funkcjonujące struktury, co umożliwiają właśnie roboty medyczne.

W badaniu porównującym dwie grupy pacjentów zaobserwowano poprawę precyzji osadzenia implantu w grupie operacji robotycznych wobec operacji tradycyjnej – wartości odstające mierzone radiograficznie wyniosły 16% wobec 76% w operacji otwartej⁵⁹. Nie stwierdzono istotnych różnic między obiema grupami w zakresie całkowitego czasu przeżycia implantu, częstości powikłań i czasu operacji. Ponadto, zmniejszone zostało ryzyko urazów tkanek miękkich (zmniejszona utrata krwi i drenaż pooperacyjny). Analiza literatury⁶⁰ endoprotezoplastyki kolana wspomaganej przez robota wykazała również lepszy niż konwencjonalna chirurgia, kąt biodro-kolano-kostka. Również funkcjonowanie kolana (mierzone wskaźnikiem Oxford Knee Score – OKS) było statystycznie lepsze. Niedawna metaanaliza wykazała poprawę krótkoterminowych wyników zgłaszanych przez pacjentów w grupie robotycznej w porównaniu z grupą operowaną konwencjonalnie⁶¹. Warto również wspomnieć, że wykorzystanie robota w tym zabiegu nie podnosi znacząco jego kosztów. Według jednego z badań były one o ok. 10% wyższe w porównaniu do operacji standardowej⁶².

3.6. Endoprotezoplastyka stawu biodrowego

W przypadku endoprotezoplastyki stawu biodrowego wspomaganą robotycznie możliwa jest bardziej precyzyjna interwencja chirurgiczna w porównaniu z podejściem tradycyjnym. Robot na bieżąco może śledzić położenie miednicy dzięki umieszczonym wcześniej w kości znacznikom i zarejestrowaniu szeregu anatomicznych punktów orientacyjnych wokół biodra. Samo planowanie przedoperacyjne przebiega w sposób zintegrowany, zaś egzekucja tego planu na sali operacyjnej jest również nadzorowana za pomocą asysty robotycznej, która wykorzystując swoje oprogramowanie pilnuje chirurga określając wirtualne granice charakterystyczne dla anatomii danego pacjenta i umożliwia dokonanie precyzyjnego frezowania. Oprogramowanie przygotowujące do zabiegu symuluje potencjalny rezultat danej czynności w tym wyborze pozycji kompletu implantów stawu biodrowego z uwzględnieniem zmian nachylenia miednicy w pozycji siedzącej, stojącej/leżącej pacjenta. System pozwala na sprawdzenie korelacji: kość do kości, kość do implantu, implant do implantu i pomaga np. wykryć ryzyko potencjalnego konfliktu panewkowo udowego (FAI).

Podczas przygotowania kości do implantacji protezy robot trzyma narzędzia lub prowadnice tych narzędzi, np. frezów kulistych w pozycji i płaszczyźnie, która została ustalona w trakcie planowania przedoperacyjnego. Podczas przygotowywania kości udowej pod implantację trzpienia udowego informacja zwrotna od robota informuje chirurga, czy to co robi, jest zgodne z pierwotnym planem. Dzięki technologii robotycznej chirurg jest w stanie bardziej precyzyjnie przygotować miejsce osadzenia, a dzięki temu również lepiej zaimplantować komponenty wchodzące w skład sztucznego stawu. Pomaga to osiągnąć optymalne umiejscowienie elementów w kości, co pozwala później na mniejsze tarcie pomiędzy ruchomymi komponentami i w konsekwencji mniejsze zużycie „nowego stawu”, czyli dłuższą przeżywalność wszczepu. W konsekwencji ocena pacjentów odnośnie skuteczności robotycznej endoprotezoplastyki biodra jest istotnie wyższa niż w przypadku operacji standardowej. Dotyczy to zarówno wskaźnika oceny funkcjonowania stawu biodrowego przez pacjenta (*Oxford Hip Score*) jak i proporcji osób, które przestały zwracać uwagę na stan stawu biodrowego jako następstwo zabiegu (*Forgotten Joint Score*)^{63 64}.

Całkowita endoprotezoplastyka biodra wspomaganą przez robota wiąże się z mniejszą liczbą powikłań śródoperacyjnych i lepszymi wynikami radiologicznymi⁶⁵. Również ograniczenie odczuwanego bólu jest wyższe w przypadku endoprotezoplastyki biodra wspomaganą robotem (zarówno po 6 tygodniach, jak i 3 miesiącach od operacji)⁶⁶.

Korzyści asysty robotycznej były wykazane również wśród otyłych pacjentów. W porównaniu z techniką tradycyjną, technika wspomaganą przez roboty zapewniła bardziej precyzyjne pozycjonowanie komponentu panewki oraz lepsze odtworzenie długości nóg, co z kolei wpływało na bardziej precyzyjne umieszczenie implantu⁶⁷.

Warto podkreślić, że niektóre analizy⁶⁸, w kraju o największym upowszechnieniu omawianego zabiegu, a więc USA, wykazały niższe koszty zabiegu robotycznego w porównaniu do zabiegu standardowego przy nieco wyższych wartościach użyteczności. Innymi słowy operacja robotyczna była tańsza i korzystniejsza dla pacjenta niż operacja standardowa.

3.7. Kompleksowe zabiegi wewnątrzczaszkowe

Zastosowanie robotyki w neurochirurgii jest ściśle powiązane z wykorzystaniem technologii obrazowania medycznego i nawigacji, które zrewolucjonizowały ten obszar medycyny w ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat. W wielu procedurach zlokalizowanie i operowanie odpowiednich obszarów wymaga znacznej wiedzy, czasu i staranności, aby uniknąć niepotrzebnego uszkodzenia tkanek. W związku z tym nawigacja przy użyciu robota ogranicza ryzyko i wyzwania związane z operacjami neurochirurgicznymi, takimi jak operowanie w bardzo delikatnych obszarach, w otoczeniu wielu naczyń krwionośnych i bardzo wrażliwego miąższu mózgu⁶⁹.

Dzięki zastosowaniu technologii robotycznej możliwe jest przede wszystkim zwiększenie dokładności operacji chirurgicznej. Staje się to szczególnie ważne w przypadkach takich jak implantacja głębokich stymulatorów mózgu. Dzięki dodaniu obrazowania śródoperacyjnego chirurg może uwzględnić niewielkie zmiany w polu operacyjnym i dostosować planowanie operacji w czasie rzeczywistym, a asysta robotyczna zapewnia precyzyjniejszą interwencję chirurgiczną w porównaniu ze standardowymi technikami⁷⁰. Niektóre roboty neurochirurgiczne wykorzystując promieniowanie jonizujące zezwalają na przeprowadzanie operacji, które dotychczas były niemożliwe do zrealizowania przy wykorzystaniu klasycznej neurochirurgii ze względu na lokalizację nowotworów. Technologia ta pozwala na przeprowadzanie małoinwazyjnych zabiegów neurochirurgicznych w precyzyjny sposób oraz otwiera nowe możliwości terapeutyczne.

Roboty operacyjne mogą być również wykorzystywane w jednej z dwóch głównych metod leczenia tętniaków mózgu: klipsowaniu. Roboty wspierają planowanie takich operacji, jak i możliwości dotarcia do celu w mniej inwazyjny sposób i bardziej precyzyjne wykonywanie operacji⁷¹. Jeśli obrazowanie miejsca interwencji wymaga użycia szkodliwego promieniowania, zaletą telechirurgii jest możliwość pozostawiania zespołu z dala od stołu operacyjnego, skracając czas przebywania w szkodliwych warunkach.

3.8. Dotychczasowe doświadczenia i potencjał zabiegów robotycznych w wymienionych procedurach w Polsce

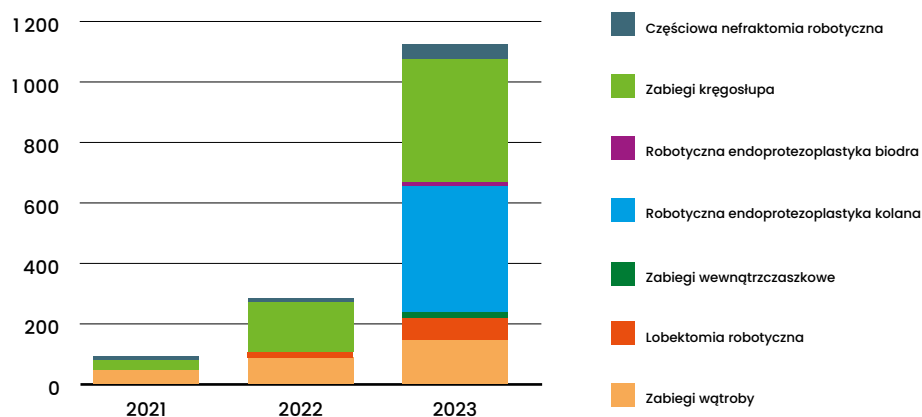
Większość wyżej wymienionych procedur jest już wykonywana w naszym kraju. Brak jest jedynie informacji o operacjach endoprotezoplastyki biodra,

natomiast takie operacje są już planowane w ciągu najbliższych miesięcy. W związku z nabytym już pewnym doświadczeniem polskiego personelu medycznego w operacjach robotycznych oraz konkretnymi korzyściami wynikającymi z asysty robota, wykazanymi w poprzednim podrozdziale, według wiedzy eksperckiej te procedury robotyczne mają najwyższy potencjał dla poprawy jakości usług zdrowotnych w Polsce.

Niektóre z wymienionych procedur są już szeroko rozpowszechnione w innych krajach świata. Przykładem niech będzie nefrektomia. W Danii, jak wcześniej wspomniano, już w 77% przypadków nefrektomię wykonuje się go jako zabieg laparoskopowy z zabiegiem wspomaganym przez robota. Dodatkowo, dzięki możliwości wykorzystania robota nieco ponad 50% operacji raka nerki w Danii to chirurgia oszczędzająca ten organ.

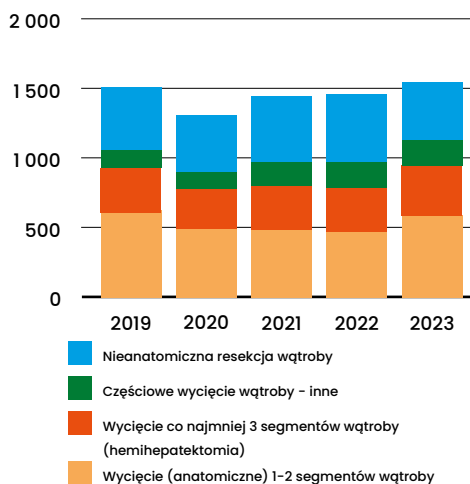
Mimo że wymienione procedury nie są indywidualnie wyceniane przez polskiego płatnika publicznego, w ostatnich latach widoczny jest skokowy wzrost ich liczby. W okresie 2021-2023 wzrosła ona prawie 14-krotnie. Za ten wzrost odpowiadały przede wszystkim zabiegi kręgosłupa i kolana.

Ryc. 9 Szacowana liczba zabiegów robotycznych w Polsce w procedurach o najwyższym potencjale



Źródło: oszacowanie na podstawie wybranych dystrybutorów robotów medycznych

Jednak oceniając potencjał wsparcia publicznego, w postaci indywidualnych wycen, właśnie tych procedur należy rozpatrzeć nie tylko obecną liczbę zabiegów robotycznych, ale również potencjał zastąpienia standardowych metod leczenia metodami robotycznym. W związku z tym w zestawieniu poniżej zebrano dane NFZ na temat liczby zabiegów^{IV}, które mogłyby być chociaż częściowo wykonywane w asyście robota.

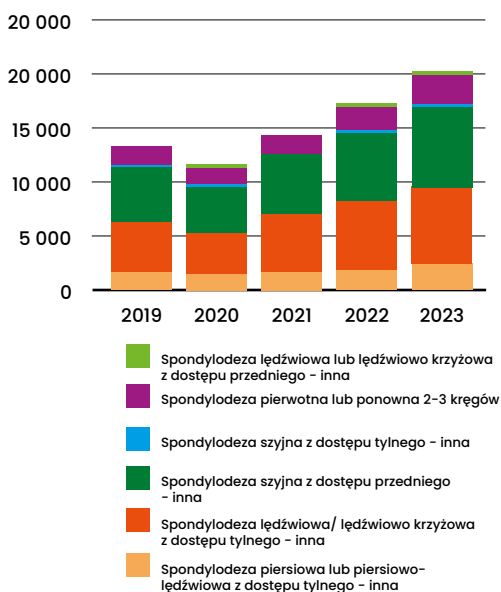
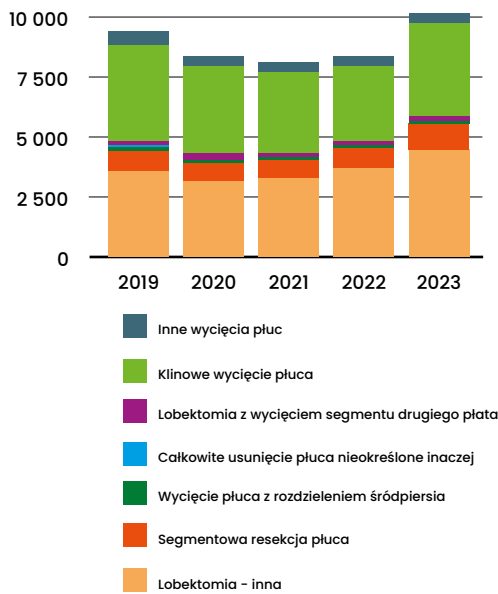
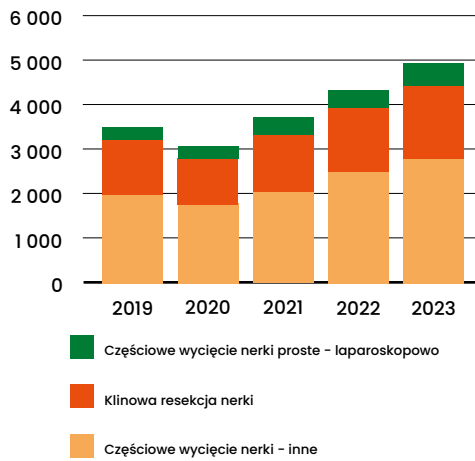


Zabiegi wątroby

Okazuje się, że zabiegi wątroby wykonywane robotycznie stanowią już ok. 10% wszystkich zabiegów resekcji wątroby. Jest to procedura, w której personel medyczny ma najwyższe doświadczenie w stosowaniu asysty robotycznej, spośród wszystkich opisywanych w tym rozdziale zabiegów.

Wydaje się, że trend liczby operacji jest stabilny, zaś ogólna liczba wykonywanych zabiegów jest wielokrotnie niższa niż dotychczas indywidualnie wycenianych procedur robotycznych – operacji macicy, jelita grubego i gruczołu krokowego.

IV Dane pochodzą z portalu <https://statystyki.nfz.gov.pl/>



Częściowa nefrektomia

Doświadczenie personelu medycznego wykonującego częściową nefrektomię w asyście robota jest niższe niż w przypadku zabiegów wątroby. Jednak biorąc pod uwagę przykład innych krajów, (np. Danii) wydaje się, że popularyzacja wykorzystania robotów w tym zabiegu będzie rosła. W efekcie nastąpi upowszechnienie operacji oszczędzających organ, z korzyścią dla pacjenta. Co ważne wzrost liczby częściowych nefrektomii w Polsce już następuje. Liczba częściowych nefrektomii jest wyższa niż zabiegów wątroby ale niższa od dotychczas indywidualnie wycenianych zabiegów robotycznych.

Chirurgia raka płuca

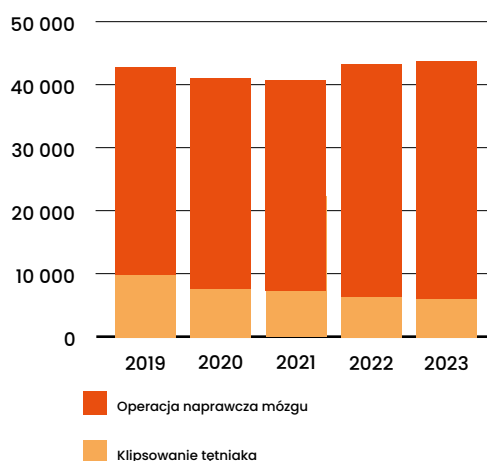
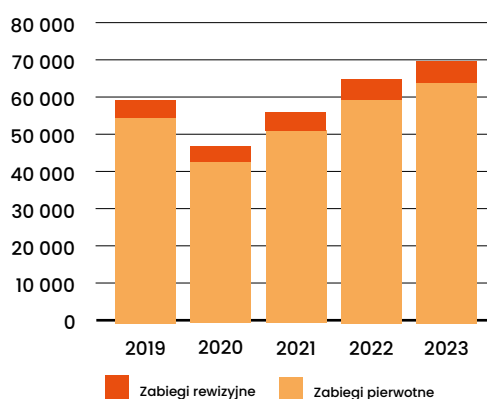
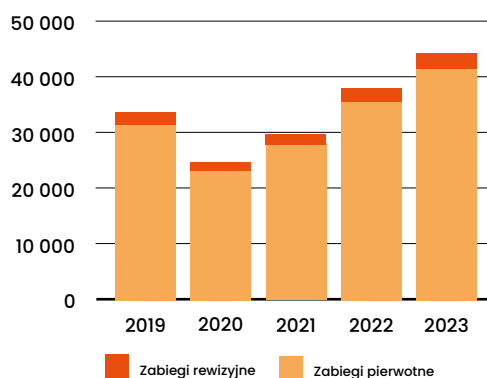
Liczba lobektomii robotycznych w Polsce osiągnęła niespełna 70 przypadków w 2023 r., ale było to i tak trzykrotnie więcej zabiegów niż w 2022 r. Wydaje się, że zainteresowanie chirurgów zastosowaniami robotycznym w tym obszarze nadal będzie rosło.

Liczba operacji raka płuca w Polsce osiągnęła ponad 10000 przypadków w 2023 r. Trend liczby zabiegów jest jednak stosunkowo stabilny, wyłączając wpływ pandemii COVID-19.

Dodatkowo widoczne są już pewne działania w kierunku wsparcia publicznego małoinwazyjnych, w tym robotycznych, operacji raka płuca. Na początku 2024 r. Agencja Oceny Technologii Medycznych i Taryfikacji w swojej analizie uznała, że zasadne jest rozważenie tych opcji terapeutycznych i przeprowadzenie pełnej oceny technologii medycznej (HTA).

Chirurgia kręgosłupa

Liczba robotycznych zabiegów kręgosłupa osiągnęła ponad 400 przypadków w 2023 r. Było to jednak kroplą w morzu ogólnej liczby operacji, która nadal dynamicznie rośnie. W 2023 r. tego typu operacji było o ponad 50% więcej niż w 2019 r. Zastanawiająca jest również liczba rewizji operacji, która w ciągu roku po zabiegu wynosi ok. 10%⁷². Zgodnie z wcześniej przytoczoną literaturą⁷³ wykorzystanie robota mogłoby radykalnie ograniczyć obecnie wysoką liczbę rewizji. Kluczowe w tym wypadku jest śledzenie długoterminowych kosztów zabiegów robotycznych i standardowych. Być może rozwiązania robotyczne okażą się mniej kosztowne, jak wskazują badania w innych krajach⁷⁴.



Endoprotezoplastyka kolana

W 2021 r. przeprowadzono pierwszy zabieg robotycznej endoprotezoplastyki kolana w Polsce. Jednak radykalny skok liczby tego typu zabiegów obserwowany był dopiero w 2023 r., kiedy ich liczba przekroczyła 400 procedur. Szacuje się, że łącznie wykonano w Polsce dotychczas ok. 1 000 procedur endoprotezoplastyki kolana z wykorzystaniem systemów robotycznych, zaś w 2024 r. rozpoczęto wykonywanie w Polsce pierwotnych połowicznych endoprotezoplastyk kolana w asyście robota. Ostatnio również wyraźnie również liczba szpitali, które tego typu zabiegi mogłyby przeprowadzić. W związku z tym z pewnością proces upowszechniania robotycznych endoprotezoplastyk kolana będzie postępował. Niewielka różnica w rzeczywistych kosztach między operacją standardową, a robotyczną może być argumentem za publicznym wsparciem tego procesu.

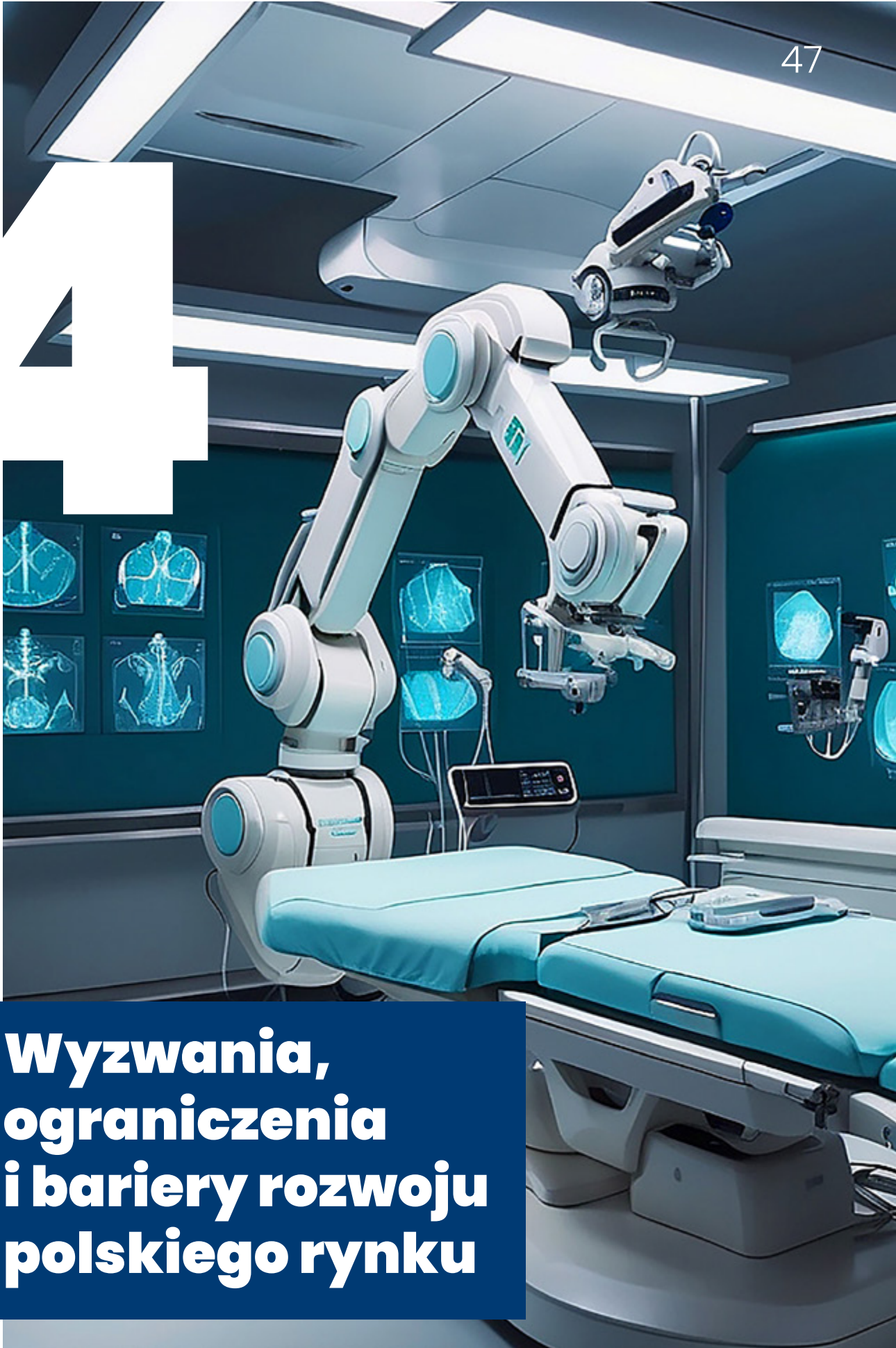
Endoprotezoplastyka biodra

W październiku 2023 r. miała miejsce pierwsza robotyczna endoprotezoplastyka biodra. Biorąc pod uwagę raportowaną w literaturze przewagę kosztową i wyższe korzyści dla pacjenta w porównaniu do operacji standardowej, spodziewane jest upowszechnienie tej metody w najbliższym okresie. Niższe koszty robotycznej endoprotezoplastyki biodra, raportowane w niektórych analizach, mocno przemawiają za publicznym wsparciem tych zabiegów, co ograniczyłoby barierę finansową w postaci dostępu do robotów zdolnych przeprowadzić tę operację.

Kompleksowe zabiegi wewnątrzczaszkowe

Dotychczas zabiegi wewnątrzczaszkowe w asyście robota są rzadkością w Polsce. Jest to zastanawiające, biorąc pod uwagę fakt, że pierwsze roboty chirurgiczne wykorzystywane były właśnie w neurochirurgii prawie 40 lat temu. Podobnie jak w innych wskazaniach, również w tym przypadku spodziewany jest wzrost liczby zabiegów wspomaganych robotycznie.

Trend operacji wewnątrzczaszkowych możliwych do zastąpienia metodami robotycznymi jest stosunkowo stabilny.



Wyzwania, ograniczenia i bariery rozwoju polskiego rynku

Na podstawie przeglądu literatury, konsultacji z ekspertami oraz przedstawicielami branży poniżej zidentyfikowano główne bariery dotyczące stosowania robotów medycznych w Polsce. Ich przewyciężenie poprawić proces upowszechnienia robotyki w polskiej służbie zdrowia.

4.1. Bariery ekonomiczne i organizacyjne

• **Wysoki koszt początkowy i znaczne koszty użytkowania robotów**

Jedną z istotnych barier w upowszechnianiu chirurgii robotycznej jest jej wysoki koszt dla świadczeniodawców. Pojedynczy system chirurgii robotycznej może kosztować ponad 2 miliony EUR. Bieżąca konserwacja i aktualizacje oprogramowania również wymagają znacznych inwestycji finansowych.

• **Odpowiednie dopasowanie wyrobu do potrzeb bywa trudne**

Chociaż systemy robotyczne oferują wiele korzyści, rozpatrywanie kwestii finansowych związanych z ich użytkowaniem jest stosunkowo złożone. Szpitale muszą zrównoważyć koszty początkowe z potencjalnymi długoterminowymi korzyściami i zapotrzebowaniem pacjentów na zabiegi zrobotyzowane. Dokładna analiza kosztów i korzyści powinna stanowić istotny (choć niejedyny) element podejmowania decyzji o przyjęciu i rozszerzeniu programów chirurgii robotycznej, biorąc pod uwagę liczbę pacjentów, stawki refundacji, dostępność tego typu zabiegów w regionie i ogólną rentowność finansową.

• **Trudności w analizie efektywności ekonomicznej robotów medycznych**

Ze względu na wysokie koszty tych innowacyjnych systemów oraz czas potrzebny na specjalistyczne szkolenia dla zaangażowanych zespołów opiekuńczych, konieczne jest przeprowadzenie solidnych ocen ekonomicznych chirurgii robotycznej, celem wsparcia interesariuszy w podejmowaniu świadomych decyzji zakupowych. Istniejące oceny ekonomiczne opierają się głównie na tradycyjnych ramach, takich jak analiza efektywności. Istnieją jednak cechy charakterystyczne robotów medycznych, a w szczególności robotycznych narzędzi chirurgicznych, które są trudne do uchwycenia w tradycyjnych ramach. Są to m.in. krzywa uczenia się, użyteczność i komfort korzystania z urządzenia, a przede wszystkim osiągnięta przez nie jakość i powtarzalność efektów.

• **Refundacja publiczna i dotychczasowe systemy finansowania często nie pozwalają w pełni zrealizować potencjału robotów medycznych**

Tam, gdzie istnieje refundacja publiczna kosztów, systemy refundacyjne bywają niedostosowane do nowoczesnych rozwiązań robotycznych. Przykładowo poziom refundacji powinien zawsze uwzględniać wyroby medyczne dedykowane operacjom robotycznym. Dopiero w tym wypadku możliwe będzie uzyskanie optymalnych wyników zdrowotnych.

Również kodowanie procedur w systemie publicznym może nie nadążać za nowymi procedurami zrobotyzowanymi, co utrudnia ich ewidencjonowanie, a przez to potwierdzenie korzyści z tych operacji i zapewnienie im odpowiedniego finansowania.

- **Początkowe stadium rozwoju rynku związane jest z koniecznością znacznych działań organizacyjnych**

Budowanie sieci dystrybutorów i wsparcia technicznego w różnych lokalizacjach geograficznych, zapewnienie dostępu do wyrobów dostosowanych do zastosowań robotycznych wymaga czasu i wielu zasobów. Oprócz tego, zdobycie zaufania użytkowników i chirurgów to kolejne duże wyzwania dla firm z segmentu robotów medycznych. Dotyczy to w szczególności nowych innowacyjnych wyrobów, których proces wdrażania na rynek jest o wiele dłuższy niż w przypadku aktualizacji ugruntowanych technologii.

- **Wykorzystywanie robotów tam, gdzie korzyści są dowiedzione**

Zaangażowanie robotów medycznych powinno mieć miejsce tam, gdzie ich zastosowanie ma dowiedzione korzyści. W innym wypadku wysokie koszty początkowe nie zostaną zbilansowane przez korzyści ekonomiczne dla pacjenta i systemu ochrony zdrowia. Istnieje wiele przykładów korzyści (patrz rozdział 2), jednak wiele badań wskazuje na brak potrzeby stosowania robotów medycznych w niektórych przypadkach. Przykładowo, przegląd 50 randomizowanych badań z 2021 r. porównujących operacje wspomagane robotem z laparoskopią i/lub otwartą operacją chirurgii brzucha lub miednicy wykazał niewielką różnicę w wynikach⁷⁵.

Mit: „Ceny narzędzi/elementów zużywalnych wykorzystywanych przy procedurach robotycznych są zbyt wysokie”

Prawda: Koszty narzędzi wykorzystywanych przy operacjach robotycznych są istotnie wyższe niż w przypadku operacji laparoskopowych⁷⁶. Wynika to przede wszystkim z ich wyższego zaawansowania technicznego w stosunku do narzędzi ręcznych. Jednak kosztów tych nie należy rozpatrywać w oderwaniu od relacji łącznych korzyści i kosztów wynikających z zastosowania procedur robotycznych. Jak wskazano w rozdziale 2.2. (obalenie mitu na temat braku korzyści stosowania systemów robotycznych) łączne korzyści stosowania robotów medycznych są opłacalne w szeregu zastosowań. Wyższe koszty instrumentów nie przekreślają racjonalności wykorzystania robotów w tych przypadkach.

4.2. Bariery regulacyjne i natury etycznej

- **Konieczność edukacji pacjenta w celu wyrażenia świadomej zgody**

Świadoma zgoda jest podstawową zasadą etyczną w opiece zdrowotnej. Pacjenci muszą kompleksowo zrozumieć ryzyko i korzyści związane z chirur-

gią robotyczną, w tym potencjalne powikłania związane ze stosowaniem tej technologii. Na świadczeniodawcach opieki zdrowotnej spoczywa obowiązek zapewnienia, aby pacjenci byli w pełni poinformowani, co pozwoli im podejmować autonomiczne decyzje dotyczące możliwości leczenia. Obecnie wiedza na ten temat jest ograniczona.

• **Kwestie odpowiedzialności**

Wprowadzenie sztucznej inteligencji i funkcji autonomicznych w chirurgii robotycznej rodzi złożone pytania dotyczące odpowiedzialności w przypadku błędów lub awarii. Określenie odpowiedzialności, gdy chirurdzy współpracują z systemami robotycznymi opartymi na sztucznej inteligencji, stanowi wyzwanie prawne^V.

• **Prywatność i bezpieczeństwo danych**

Gromadzenie i przekazywanie danych pacjentów podczas telechirurgii lub chirurgii zdalnej może budzić obawy dotyczące prywatności i bezpieczeństwa danych. Szczególnie w sprawach dotyczących wrażliwych informacji medycznych zachowanie poufności i bezpieczeństwa danych pacjentów ma kluczowe znaczenie.

4.3. Bariery technologiczne

• **Wyzwania śródoperacyjne**

Chirurdzy operujący z systemami robotycznymi muszą być przygotowani na radzenie sobie z nieoczekiwanymi wyzwaniami śródoperacyjnymi. Mogą to być awarie ramienia robota, problemy z komunikacją między chirurgiem przy konsoli a resztą personelu medycznego lub nieprzewidziane przeszkody podczas zabiegu.

• **Brak lub niższe odczuwanie dotykowego sprzężenia zwrotnego**

Chociaż w haptyczne sprzężenie zwrotne wyposażone są już pewne systemy robotyczne, oferując przykładowo wirtualne granice tzw. line assist, by zatrzymać rękę chirurga przed popełnieniem błędu, w przyszłości oczekiwany jest pełniejszy zakres wrażeń dotykowych dostępnych w chirurgii. Obecne ograniczenie może teoretycznie wpływać na zdolność chirurga do oceny właściwości tkanki, takich jak tekstura, napięcie i elastyczność.

• **Ograniczona możliwość wykorzystania obrazów uzyskiwanych z innych urządzeń diagnostycznych**

Wyzwaniem jest precyzyjne wykorzystanie podczas operacji obrazów lub badań diagnostycznych, co może znacząco wpływać na precyzję, bezpie-

^V Podjęto już próby opracowania wytycznych co do stosowania sztucznej inteligencji w zabiegach wykonywanych w asyście robotów medycznych. Projekt takich zapisów przygotowała chociażby Naczelna Izba Lekarska (patrz: https://nil.org.pl/uploaded_files/art_1725370731_art12-projekt-komentarza.pdf).

czeństwo i jakość leczenia. Nakładanie precyzyjnego obrazu 3D z planowania, obrazu tomografu, rezonansu czy USG pozwoliłoby na poprawę jakości terapeutycznej.

• **Ograniczenia infrastrukturalne**

Często wyzwaniem dla szpitala jest umiejscowienie systemu robotycznego na bloku operacyjnym. Ograniczenie może wynikać z kilku przyczyn: stropy w starych budynkach nie są przystosowane do obciążenia wagą robota chirurgicznego; wielkość sali operacyjnej jest niewystarczająca, żeby zmieścić system robotyczny lub mała ilość dostępnych sal operacyjnych w podmiocie leczniczym nie pozwala na dedykowanie sali operacyjnej wyłącznie robotyce. Warto wspomnieć, że w ostatnich latach producenci robotów zwiększają ich mobilność, co ogranicza bariery infrastrukturalne.

4.4. Bariery edukacyjne i kadrowe

• **Uzależnienie od technologii**

Niektóre systemy robotyczne mogą być tak zaawansowane, że efektem ich wykorzystania może być uzależnienie personelu medycznego od swojego wsparcia. Wyzwaniem jest to, aby kształcić personel medyczny w korzystaniu z robotów, jednocześnie zapewniając im wiedzę pozwalającą na przeprowadzenie usług medycznych bez ich udziału.

• **Konieczność ciągłych szkoleń**

Osiągnięcie biegłości w chirurgii robotycznej wymaga specjalistycznego szkolenia oraz zaangażowania czasu. Programy szkoleniowe zazwyczaj obejmują praktyczne symulacje, nadzorowane szkolenie przy udziale pacjentów i oceny biegłości. Jednak kształcenie to powinno przebiegać w sposób ciągły, w związku z koniecznością utrzymania chirurgów na bieżąco z rozwijającymi się technologiami i technikami.

• **Przejsie z technik konwencjonalnych**

Doświadczeni chirurdzy przechodzący do chirurgii robotycznej mogą napotkać różne wyzwania, dostosowując swoje umiejętności i techniki do tej technologii. Przejsie od tradycyjnej chirurgii otwartej lub laparoskopowej do chirurgii robotycznej wiąże się ze zmianą podejścia i koniecznością opanowania nowego zestawu narzędzi. Podczas tej fazy uczenia się wyniki leczenia mogą ulec pogorszeniu, ponieważ chirurdzy zapoznają się z niuansami procedur robotycznych.

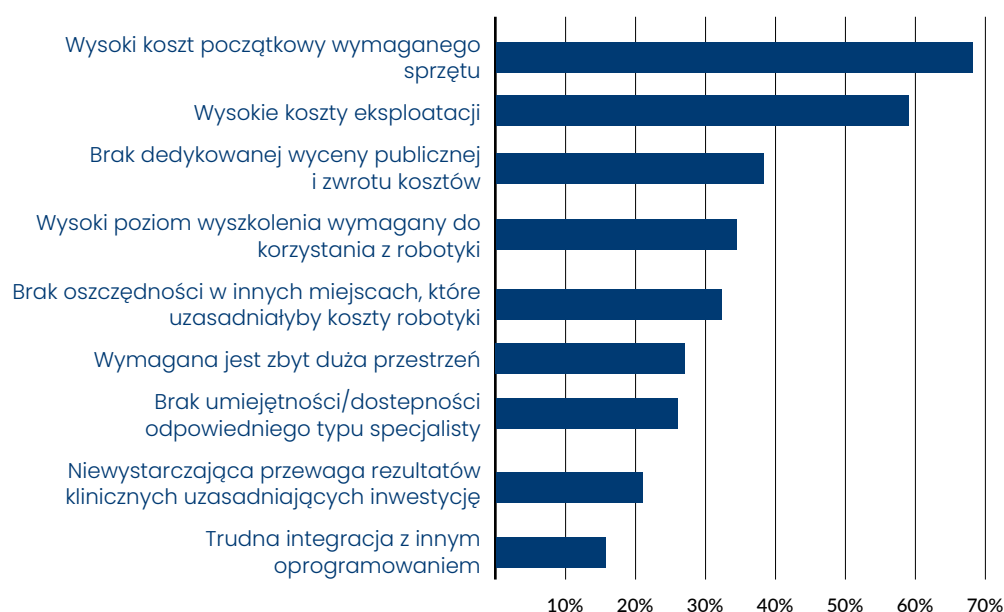
• **Ograniczona świadomość pacjenta**

Istotną przeszkodą w akceptacji chirurgii robotycznej przez pacjentów jest ograniczona świadomość tej zaawansowanej technologii. Wielu pacjentom brak pewności co do wyboru tej opcji, gdy jest to właściwe. Pacjenci mogą mieć obawy co do bezpieczeństwa i skuteczności chirurgii robotycznej, co może zniechęcić ich do rozważenia tego podejścia.

4.5. Porównanie zidentyfikowanych barier dla Polski do doświadczeń europejskich

Na podstawie analiz na rynku polskim oraz ankiety wśród chirurgów robotycznych w największych krajach Europy należy stwierdzić, że podstawową barierą stojącą na drodze do upowszechnienia robotyki medycznej są aspekty ekonomiczne. Chirurgi z wybranych krajów europejskich w zdecydowanie niższym stopniu wskazują na bariery technologiczne czy edukacyjne i kadrowe. Pomijają zaś praktycznie bariery regulacyjne i natury etycznej.

Ryc. 10 Odsetek europejskich chirurgów wykonujących operacje robotyczne, którzy zdecydowanie zgadzają się z każdą wymienioną barierą (ocenione na 6 lub 7 w 7-stopniowej skali; próba 170 chirurgów z Niemiec, Włoch, Hiszpanii, Francji i Wielkiej Brytanii)



Źródło: Ipsos (2020): *Future of the Operating Room*.



Rekomendacje wsparcia zastosowań robotycznych w ochronie zdrowia

5.1. Rekomendacje dla regulatora i płatnika publicznego

- » **System finansowania publicznej opieki zdrowotnej powinien iść w kierunku koncepcji opieki zdrowotnej opartej o wartość.** W ten sposób uwzględniane byłyby nie tylko koszty samych zabiegów, ale także wynikające z ich przeprowadzenia długoterminowe korzyści. Wspierałoby to adopcję rozwiązań robotycznych, które często wykazują swoją przewagę ekonomiczną nad standardowymi metodami w długim okresie czasu.
- » Do czasu wdrożenia koncepcji opieki zdrowotnej opartej o wartość należy **wspierać zastosowania robotyczne poprzez ich indywidualną wycenę w ramach jednolitych grup pacjentów.** Powinna ona uwzględniać dowody naukowe, korzyści wykorzystywania robotów medycznych oraz ich pełne koszty, w tym zawierać wyroby medyczne wykorzystywane do zabiegów robotycznych (poprzez ustalenie dedykowanych wycen dla procedur o największym potencjale). Wymaga to także wyróżnienia procedur robotycznych w systemach sprawozdawczych systemu opieki zdrowotnej, zwracając uwagę na rodzaj wykorzystywanego robota.
- » Cennym elementem porządkującym rynek byłoby **określenie czytelnej i przewidywalnej strategii** i oczekiwanego przez organy administracji docelowego modelu rozwoju tego segmentu. Określenie np. warunków włączania poszczególnych procedur do koszyka świadczeń gwarantowanych (lub planów wykorzystania innych instrumentów wsparcia, także omówionych w niniejszej publikacji), zwiększyłoby przejrzystość i długoterminową przewidywalność warunków inwestycyjnych zarówno dla szpitali, jak i dla płatnika.
- » Warto podkreślić potrzebę **monitorowania jakości procedur robotycznych np. poprzez wdrożenie rejestrów zabiegów robotycznych** i docelowe powiązanie finansowania z wynikami terapii. Należy rozważyć aktualizację map potrzeb zdrowotnych w obszarze sprzętu medycznego tak, aby lepiej uwzględniała postęp technologii, w tym robotów medycznych.

5.2. Rekomendacje dla personelu medycznego

- » Zadaniem pracowników służby zdrowia jest **otwarta i przejrzysta komunikacja z pacjentami.** Już na tym etapie istnieje duży potencjał rozwiania ich ewentualnych obaw i błędnych przekonań na temat technologii robotycznych. Rzetelna informacja o spodziewanych wynikach klinicznych oraz podkreślanie przebytego rygorystycznego szkolenia i wiedzy zespołów chirurgicznych w zakresie systemów robotycznych może pomóc złagodzić postrzegane ryzyko i zbudować zaufanie pacjentów. Świadczeniodawcy muszą nadać priorytet kampaniom edukacyjnym i uświadamiającym pacjentów. Pacjenci mogą w ich efekcie podejmować bardziej świadome decyzje dotyczące swojej opieki zdrowotnej po uprzednim uzyskaniu wyczerpujących informacji na temat chirurgii robotycznej, jej zalet i przydatności do określonych zastosowań.

- » **Instytucje opieki zdrowotnej muszą zapewnić wsparcie i zasoby, aby ułatwić nabywanie umiejętności korzystania z robotów medycznych przez personel medyczny.** Dotyczy to w szczególności wypracowania odpowiednich zachęt i warunków do podwyższania kwalifikacji operatorów, nadzoru i możliwości doskonalenia umiejętności. Ważne jest również dzielenie się dobrymi praktykami w zakresie zamówień i przetargów oraz korzystania z robotów medycznych między ośrodkami, które mają doświadczenie, a podmiotami początkującymi w tym obszarze.

5.3. Rekomendacje dla instytucji finansujących

- » Instytucje finansujące, np. we współpracy z producentami robotów medycznych, powinny rozważyć **upowszechnienie różnorodnych modeli finansowania**, jak np. umowy o zakupach grupowych, leasingi i wypożyczenia, ustalenia dotyczące finansowania długoterminowego lub partnerstwa z bardziej rozbudowanymi placówkami.
- » Mimo, że jest rozwój technologiczny jest bez wątpienia pozytywny, ciągły rozwój systemów robotycznych chirurgii robotycznej w celu poprawy jakości i dodawania lepszych funkcjonalności sprawia, że starsze wersje mogą stosunkowo szybko stać się przestarzałymi i wymagać wymiany. W związku z tym, należy rozważyć **możliwość finansowania wykorzystania używanych robotów medycznych w zainteresowanych tego typu produktami ośrodkach.**

5.4. Rekomendacje dla uczelni i towarzystw naukowych

- » Należy rozważyć **wprowadzenie podstawowego modułu nauczania** na uczelniach publicznych oraz prywatnych, który wspierałby edukację w zakresie możliwości urządzeń robotycznych. Należy jednak w tym kontekście podkreślić, że taki zakres edukacji nie powinien mieć na celu zastąpienia dedykowanych szkoleń technicznych oferowanych przez producentów.
- » Należy rozważyć **stworzenie np. dedykowanych sekcji lub grup roboczych, np. w ramach towarzystw naukowych**, których celami byłoby m.in. monitorowanie stanu rozwoju rynku robotycznego w danej dziedzinie i poszukiwanie możliwości poprawy kwalifikacji specjalistów.

1. Hockstein NG, Gourin CG, Faust RA, Terris DJ. A history of robots: from science fiction to surgical robotics. *J Robot Surg*. 2007;1(2):113-8. doi: 10.1007/s11701-007-0021-2. Epub 2007 Mar 17. PMID: 25484946; PMCID: PMC4247417.
2. Zuo KJ, Olson JL. The evolution of functional hand replacement: From iron prostheses to hand transplantation. *Plast Surg (Oakv)*. 2014 Spring;22(1):44-51. PMID: 25152647; PMCID: PMC4128433.
3. Taylor, 1997; Cleary and Nguyen, 2001; Hockstein et al., 2007; Dogangil et al., 2010; Enayati et al., 2016; Yang et al., 2017a; George Thuruthel et al., 2018.
4. Cianchetti et al., 2018; Dombre, E., 2003. Introduction to Medical Robotics, Summer European University on Surgical Robotics, Montpellier, <https://www.lirmm.fr/UEE07/presentations/lecturers/Dombre.pdf>, (a także Garcia-Aracil et al., 2017; Mohammed et al., 2017; Shishehgar et al., 2018). Taylor (1997)
5. Pierce, H, Roberts, B, Scherr, D. et al. Patient injuries and malfunctions associated with robotic prostatectomy: review of the manufacturer and user facility device experience database. *J Robotic Surg* 15, 179–185 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11701-020-01088-1>
6. Hôpitaux Universitaires Genève (2024): Etat de l'art de la chirurgie robotique.
7. Forslund Jacobsen M, Konge L, Alberti M, la Cour M, Park YS, Thomsen ASS. ROBOT-ASSISTED VITREORETINAL SURGERY IMPROVES SURGICAL ACCURACY COMPARED WITH MANUAL SURGERY: A Randomized Trial in a Simulated Setting. *Retina*. 2020 Nov;40(11):2091-2098. doi: 10.1097/IAE.0000000000002720. PMID: 31842191; PMCID: PMC7575030.
8. Khan H, Dhillon K, Mahapatra P, et al. Blood loss and transfusion risk in robotic-assisted knee arthroplasty: a retrospective analysis. *Int J Med Robot*. 2021; 17(6):e2308. <https://doi.org/10.1002/rcs.2308>
9. Sung Uk Bae, Woon Kyung Jegon, Seong Kyu Baek. Single plus one-port robotic surgery using the da Vinci Single-Site Platform versus conventional multi-port laparoscopic surgery for left-sided colon cancer Videosurgery Miniinv. 2022; 17(1): 179–187. DOI: <https://doi.org/10.5114/wiitm.2021.112678>.
10. Betcher, R.E., Chaney, J.P., Lacy, P.R. et al. Analysis of postoperative pain in robotic versus traditional laparoscopic hysterectomy. *J Robotic Surg* 8, 35–41 (2014). <https://doi.org/10.1007/s11701-013-0418-z>
11. Feng Q, Yuan W, Li T, et al. Robotic versus laparoscopic surgery for middle and low rectal cancer (REAL): short-term outcomes of a multicentre randomised controlled trial. *Lancet Gastroenterol Hepatol* 2022;7:991-1004.
12. Sng Y, Ong C.K, Lai Y.F. Approaches to outpatient pharmacy automation: a systematic review. *Eur. J. Hosp. Pharm*. 2019;26:157–162. doi: 10.1136/ejh-pharm-2017-001424.
13. Ee WW, Lau WL, Yeo W, Von Bing Y, Yue WM. Does minimally invasive surgery have a lower risk of surgical site infections compared with open spinal surgery?. *Clin Orthop Relat Res*. 2014, 472:1718-24. 10.1007/s11999-013-3158-5
14. Panteleimonitis S, Pickering O, Abbas H, et al: Robotic rectal cancer surgery in obese patients may lead to better short-term outcomes when compared to laparoscopy. A comparative propensity scored match study. *Int J Colorectal Dis*. 2018, 33:1079–86. 10.1007/s00384-018-3030-x
15. Shaw JH, Rahman TM, Wesemann LD, Z Jiang C, G Lindsay-Rivera K, Davis JJ. Comparison of Postoperative Instability and Acetabular Cup Positioning in Robotic-Assisted Versus Traditional Total Hip Arthroplasty. *J Arthroplasty*. 2022 Aug;37(8S):S881-S889. doi: 10.1016/j.arth.2022.02.002. Epub 2022 Feb 8. PMID: 35143923.
16. Dharia Patel S. P, Steinkampf M. P, Whitten S. J., and Malizia B. A., Robotic tubal anastomosis: surgical technique and cost effectiveness, *Fertility and Sterility*. (2008) 90, no. 4, 1175–1179, 2-s2.0-52949106159,

17. Kayani B, Konan S, Tahmassebi J, Pietrzak JRT, Haddad FS. Robotic-arm assisted total knee arthroplasty is associated with improved early functional recovery and reduced time to hospital discharge compared with conventional jig-based total knee arthroplasty: a prospective cohort study. *Bone Joint J.* 2018 Jul; 100-B(7):930-937. doi: 10.1302/0301-620X.100B7.BJJ-2017-1449.R1.
18. Wang F, Sun X, Li J. Surgical smoke removal via residual swin transformer network. *Int J Comput Assist Radiol Surg.* 2023;18(8):1417-1427. doi: 10.1007/s11548-023-02835-z
19. Mi H, T W, Jq Z, Yj S, Tj G, Lk Z, J L, Jf Y. Evaluation of external contamination on the vial surfaces of some hazardous drugs that commonly used in Chinese hospitals and comparison between environmental contamination generated during robotic compounding by IV. Dispensing robot vs. manual compounding in biological safety cabinet. *J Oncol Pharm Pract.* 2022 Oct;28(7):1487-1498. doi: 10.1177/10781552211023571.
20. Plerhoples TA, Hernandez-Boussard T, Wren SM. The aching surgeon: a survey of physical discomfort and symptoms following open, laparoscopic, and robotic surgery. *J Robot Surg.* 2012;6(1):6
21. Chandra V, Nehra D, Parent R, Woo R, Reyes R, Hernandez-Boussard T, et al. A comparison of laparoscopic and robotic assisted suturing performance by experts and novices. *Surgery* 2010;147:830-9.
22. Calloni T, Antolini L, Roumy LG, Nicolosi F, Carrabba GG, Di Cristofori A, Fontanella MM, Giussani CG. Exoscope and operative microscope for training in micro-neurosurgery: A laboratory investigation on a model of cranial approach. *Front Surg.* 2023 Mar 24;10:1150981. doi: 10.3389/fsurg.2023.1150981. PMID: 37056300; PMCID: PMC10089287.
23. Baeten IGT, Hoogendam JP, Schreuder HWR, Jürgenliemk-Schulz IM, Gerestein CG, Zweemer RP. Introducing a novice surgeon to an experienced robotic gynaecological oncology team: An observational cohort study on the impact of a structured curriculum on outcomes of cervical cancer surgery. *Gynecol Oncol.* 2023 Nov;178:153-160. doi: 10.1016/j.ygyno.2023.10.008.
24. Laungani RG, Shah NL. The economics of robotic urologic surgery in the United States and its role within a community hospital and cancer center [abstract] *Eur Urol Suppl.* 2010 Sep;9(5 Suppl 3):507.
25. Ollendorf DA, Hayes J, McMahon P, Pearson SD. Active surveillance & radical prostatectomy for the management of low-risk, clinically-localized prostate cancer [Internet]. Boston (MA): Institute for Clinical and Economic Review; Sep 11, 2009.
26. Martínez-Maestre MA, Melero-Cortés LM, Coronado PJ, González-Cejudo C, García-Agua N, García-Ruiz AJ, Jódar-Sánchez F. Long term COST-minimization analysis of robot-assisted hysterectomy versus conventional laparoscopic hysterectomy. *Health Econ Rev.* 2019 Jun 18;9(1):18. doi: 10.1186/s13561-019-0236-8.
27. Sommer D, Kasbauer J, Jakob D, Schmidt S, Wahl F. Potential of Assistive Robots in Clinical Nursing: An Observational Study of Nurses' Transportation Tasks in Rural Clinics of Bavaria, Germany. *Nurs Rep.* 2024 Jan 24;14(1):267-286. doi: 10.3390/nursrep14010021.
28. Giménez, E, Reynolds, J. & Espallargues, M., 2019. Evaluación del impacto económico, organizativo económico, y de la seguridad de la dispensación robotizada de fármacos en hospitales en España, s.l.: Informes de Evaluación de Tecnologías Sanitarias.
29. <https://www.plymouth.ac.uk/news/uk-first-disinfection-robot-could-enable-more-medical-procedures-and-help-cut-waiting-lists>
30. Dupont PE, Nelson BJ, Goldfarb M, Hannaford B, Menciassi A, O'Malley MK, Simaan N, Valdastrì P, Yang GZ. A decade retrospective of medical robotics research from 2010 to 2020. *Sci Robot.* 2021 Nov 10;6(60):eabi8017. doi: 10.1126/scirobotics.abi8017. Epub 2021 Nov 10. PMID: 34757801; PMCID: PMC8890492.
31. Jensen, P. T., & Mogensen, O. (2022). Robotkirurgi er bredt implementeret indenfor gynækologien i Danmark [Robotic surgery has been widely adopted within gynaecology in Denmark]. *Ugeskrift for læger*, 184: V12210942.

- Dohrn, N., de Heer, P., Burgdorf, S. K., Jensen, K. K., Klein, M. F., & Gögenur, I. (2022). Anvendelse og evidens for robotkirurgi indenfor abdominalkirurgi. *Ugeskrift for Laeger*, 184(36), Article V11210888.
32. <https://www.phin.org.uk/news/sharp-growth-in-robot-assisted-surgery-in-uk-hospitals>
33. Rizzo KR, Grasso S, Ford B, Myers A, Ofstun E, Walker A. Status of robotic assisted surgery (RAS) and the effects of Coronavirus (COVID-19) on RAS in the Department of Defense (DoD). *J Robot Surg*. 2023 Apr;17(2):413-417. doi: 10.1007/s11701-022-01432-7
34. Sadri H, Fung-Kee-Fung M, Shayegan B, Garneau PY, Pezeshki P. A systematic review of full economic evaluations of robotic-assisted surgery in thoracic and abdominopelvic procedures. *J Robot Surg*. 2023 Dec;17(6):2671-2685. doi: 10.1007/s11701-023-01731-7. Epub 2023 Oct 16. PMID: 37843673; PMCID: PMC10678817.
35. Charland N, Hadaya J, Mallick S, Tran Z, Cho NY, Le N, Kim S, Mukherjee K, Benharash P. National trends and outcomes of robotic emergency general surgery in the United States. *Surgery*. 2024 Jun 24:S0039-6060(24)00295-2. doi: 10.1016/j.surg.2024.05.002.
36. Sadri H, Fung-Kee-Fung M, Shayegan B, Garneau PY, Pezeshki P. A systematic review of full economic evaluations of robotic-assisted surgery in thoracic and abdominopelvic procedures. *J Robot Surg*. 2023 Dec;17(6):2671-2685. doi: 10.1007/s11701-023-01731-7. Epub 2023 Oct 16. PMID: 37843673; PMCID: PMC10678817.
37. <https://www.supplychain.nhs.uk/product-information/contract-launch-brief/robotic-medical-equipment/>
38. Ryan D. Rosen, DO and David A. Edelman. Should Organizational Investment in Robotic Surgical Technology Ever Influence Surgeons' Decisions About Surgical Approach to Patients' Surgical Care? *AMA J Ethics*. 2023;25(8):E575-582. doi: 10.1001/amajethics.2023.575.
39. <https://j-robo.or.jp/robot/da-vinci/hoken/>; <https://j-robo.or.jp/robot/hinotori/hoken/>
40. Modern Health Institute (2023): Chirurgia Robotowa.
41. Modern Health Institute (2024): Chirurgia Robotowa.
42. Axén E, Stranne J, Månsson M, Holmberg E, Arnsrud Godtman R. Biochemical recurrence after radical prostatectomy - a large, comprehensive, population-based study with long follow-up. *Scand J Urol*. 2022 Aug;56(4):287-292. doi: 10.1080/21681805.2022.2108140. Epub 2022 Aug 21. PMID: 35993346.
- Ventimiglia E, Folkvaljon Y, Carlsson S, Bratt O, Montorsi F, Volz D, Johansson E, Stattin P. Nationwide, population-based study of post radical prostatectomy urinary incontinence correction surgery. *J Surg Oncol*. 2018 Feb;117(2):321-327. doi: 10.1002/jso.24816. Epub 2017 Sep 6. PMID: 28876467; PMCID: PMC5873254.
- Koo KC, Lee KS, Chung BH. Urologic cancers in Korea. *Jpn J Clin Oncol*. 2015 Sep;45(9):805-11. doi: 10.1093/jjco/hyv096. Epub 2015 Jun 27. PMID: 26117494.
43. T M H Gall, W Alrawashdeh, N Soomro, S White, L R Jiao, Shortening surgical training through robotics: randomized clinical trial of laparoscopic versus robotic surgical learning curves, *BJS Open*, Volume 4, Issue 6, December 2020, Pages 1100-1108, <https://doi.org/10.1002/bjs5.50353>
44. Barros F, Felicio VB, Tabet ACL, Cerbone ACC. Training in robotic surgery: initial experience using the Brazilian College of Surgeons model. *Rev Col Bras Cir*. 2021 Jun 14;48:e20202969. doi: 10.1590/0100-6991e-20202969. PMID: 34133655; PMCID: PMC10683448.
45. Croner, R, Gumbs, A, Perrakis, A, Andric, M, Stockheim, J, Lorenz, E, Arend, J, Franz, M, & Rahimli, M. (2021). Robotic vs. laparoscopic liver surgery: what are the advantages of the robot?. *Digestive Medicine Research*, 4. doi:10.21037/dmr-21-26
46. Zhang B, Pan Y, Chen K, et al. Laparoscopy-Assisted versus Open Hepatectomy for Live Liver Donor. Systematic Review and Meta-Analysis. *Can J Gastroenterol Hepatol* 2017;2017:2956749
47. Ibidem.
48. Gul, Zeynep G.; Tam, Andrew; Badani, Ketan K,*. Robotic partial nephrectomy. The current status. *Indian Journal of Urology* 36(1):p 16-20, Jan-Mar 2020. | DOI: 10.4103/iju.IJU_174_19

49. Ruiz Guerrero E, Claro AVO, Ledo Cepero MJ, Soto Delgado M, Álvarez-Ossorio Fernández JL. Robotic versus Laparoscopic Partial Nephrectomy in the New Era: Systematic Review. *Cancers (Basel)*. 2023 Mar 16;15(6):1793. doi: 10.3390/cancers15061793.
50. Liu, Y, Shan, L, Shen, J, Liu, L, Wang, J, He, J, He, Q, Jiang, L, Guo, M, Chen, X, Zeng, H, Xia, X, Peng, G, Liang, W. and He, J. (2019), Choice of surgical procedure – lobectomy, segmentectomy, or wedge resection – for patients with stage T1-2N0M0 small cell lung cancer: A population-based study. *Thorac Cancer*, 10: 593-600. <https://doi.org/10.1111/1759-7714.12943>
51. Oh, Daniel S. et al. Robotic-Assisted, Video-Assisted Thoracoscopic and Open Lobectomy: Propensity-Matched Analysis of Recent Premier Data. *The Annals of Thoracic Surgery*, Volume 104, Issue 5, 1733 – 1740
52. Kent, Michael S. MD*; Hartwig, Matthew G. MD†; Vallières, Eric MD‡; Abbas, Abbas E. MD§; Cerfolio, Robert J. MD||; Dylewski, Mark R. MD¶; Fabian, Thomas MD#; Herrera, Luis J. MD**; Jett, Kimble G. MD††; Lazzaro, Richard S. MD‡‡; Meyers, Bryan MD§§; Mitzman, Brian A. MD|||; Reddy, Rishindra M. MD¶¶; Reed, Michael F. MD##; Rice, David C. MD, MB***; Ross, Patrick MD†††; Sarkaria, Inderpal S. MD‡‡‡; Schumacher, Lana Y. MD, MS§§§; Tisol, William B. MD||||; Wigle, Dennis A. MD¶¶¶; Zervos, Michael MD||. Pulmonary Open, Robotic, and Thoracoscopic Lobectomy (PORTaL) Study: An Analysis of 5721 Cases. *Annals of Surgery* 277(3):p 528-533, March 2023. | DOI: 10.1097/SLA.0000000000005115
53. Kantelhardt SR, Martinez R, Baerwinkel S, Burger R, Giese A, Rohde V. Perioperative course and accuracy of screw positioning in conventional, open robotic-guided and percutaneous robotic-guided, pedicle screw placement. *Eur Spine J*. 2011;20:860-868. doi:10.1007/s00586-011-1729-2
54. Wang JQ, Wang Y, Feng Y, et al. Percutaneous sacroiliac screw placement: A prospective randomized comparison of robot-assisted navigation procedures with a conventional technique. *Chin Med J (Engl)*. 2017. doi:10.4103/0366-6999.217080
55. Good CR, Orosz L, Schroerlucke SR, Cannestra A, Lim JY, Hsu VW, Zahrawi F, Villalobos HJ, Ramirez PM, Sweeney T, Wang MY. Complications and Revision Rates in Minimally Invasive Robotic-Guided Versus Fluoroscopic-Guided Spinal Fusions: The MIS ReFRESH Prospective Comparative Study. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2021 Dec 1;46(23):1661-1668. doi: 10.1097/BRS.0000000000004048. PMID: 33826591; PMCID: PMC8565511.
56. Sun WX, Huang WQ, Li HY, Wang HS, Guo SL, Dong J, Chen BL, Lin YP. Clinical efficacy of robotic spine surgery: an updated systematic review of 20 randomized controlled trials. *EFORT Open Rev*. 2023 Nov 1;8(11):841-853. doi: 10.1530/EOR-23-0125. PMID: 37909700; PMCID: PMC10646522.
57. Cui GY Han XG Wei Y Liu YJ He D Sun YQ Liu B & Tian W. Robot-assisted minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion in the treatment of lumbar spondylolisthesis. *Orthopaedic Surgery* 2021 13 1960-1968. (10.1111/os.13044)
58. Sun WX, Huang WQ, Li HY, Wang HS, Guo SL, Dong J, Chen BL, Lin YP. Clinical efficacy of robotic spine surgery: an updated systematic review of 20 randomized controlled trials. *EFORT Open Rev*. 2023 Nov 1;8(11):841-853. doi: 10.1530/EOR-23-0125. PMID: 37909700; PMCID: PMC10646522.
59. Iqbal J, Covell MM, Jabeen S, Nadeem A, Malik Gunjial H, Abdus Saboor H, Amin A, Salman Y, Hafeez MH, Bowers CA. Comparative analysis of exoscope-assisted spine surgery versus operating microscope: A systematic review. *World Neurosurg X*. 2023 Dec 10;21:100258. doi: 10.1016/j.wnsx.2023.100258. PMID: 38173684; PMCID: PMC10762452.
60. Mancino F, Cacciola G, Malahias MA, De Filippis R, De Marco D, Di Matteo V, A G, Sculco PK, Maccauro G, De Martino I. Jakiej są zalety całkowitej endoprotezoplastyki stawu kolanowego wspomaganiej przez robota w porównaniu z konwencjonalną manualną całkowitą endoprotezoplastyką stawu kolanowego? Systematyczny przegląd badań porównawczych. *Orthop Rev (Pavia)*. 2020 25 czerwca; 12(Suplement 1):8657. doi: 10.4081/or.2020.8657.
61. Ghazal AH, Fozo ZA, Matar SG, Kamal I, Gamal MH, Ragab KM. Robotic Versus Conventional Unicompartmental Knee Surgery: A Comprehensive Systematic Review and Meta-Analysis. *Cureus*. 2023 Oct 8;15(10):e46681. doi: 10.7759/cureus.46681. PMID: 37869054; PMCID: PMC10589056.

62. Zhang J, Ndou WS, Ng N, Gaston P, Simpson PM, Macpherson GJ, Patton JT, Clement ND. Robotic-arm assisted total knee arthroplasty is associated with improved accuracy and patient reported outcomes: a systematic review and meta-analysis. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* (2021) 10.1007/s00167-021-06464-4 34766190
63. Christopher J. Fang, John C. Mazzocco, Daniel C. Sun, Jonathan M. Shaker, Carl T. Talamo, David A. Mattingly, Eric L. Smith, Total Knee Arthroplasty Hospital Costs by Time-Driven Activity-Based Costing: Robotic vs Conventional, *Arthroplasty Today*, Volume 13, 2022, Pages 43-47, ISSN 2352-3441, <https://doi.org/10.1016/j.artd.2021.11.008>.
64. Perets I, Walsh JP, Close MR, Mu BH, Yuen LC, Domb BG. Robot-assisted total hip arthroplasty. Clinical outcomes and complication rate. *Int J Med Robot*. 2018 Aug;14(4):e1912. doi: 10.1002/rcs.1912. Epub 2018 May 15. PMID: 29761618.
65. Clement ND, Gaston P, Bell A, et al. Robotic arm-assisted versus manual total hip arthroplasty. *Bone Joint Res*. 2021;10(1):22-30. doi:10.1302/2046-3758.101.
66. Kort, N, Stirling, P, Pilot, P, & Müller, J. H. (2021). Clinical and surgical outcomes of robot-assisted versus conventional total hip arthroplasty: a systematic overview of meta-analyses. *EFORT Open Reviews*, 6(12), 1157-1165. Retrieved Sep 9, 2024, from <https://doi.org/10.1302/2058-5241.6.200121>
67. Alana Prinos, Weston Buehring, Catherine Di Gangi, Patrick Meere, Morteza Meftah, Matthew Hepinstall, Robot-Assisted Total Hip Arthroplasty Demonstrates Improved 90-Day Clinical and Patient-Reported Outcomes, *Arthroplasty Today*, Volume 27, 2024, 101393, ISSN 2352-3441, <https://doi.org/10.1016/j.artd.2024.101393>.
68. Zhang, S, Liu, Y, Yang, M. et al. Robotic-assisted versus manual total hip arthroplasty in obese patients: a retrospective case-control study. *J Orthop Surg Res* 17, 368 (2022). <https://doi.org/10.1186/s13018-022-03263-6>
69. Maldonado DR, Go CC, Kyin C, Rosinsky PJ, Shapira J, Lall AC, Domb BG. Robotic Arm-assisted Total Hip Arthroplasty is More Cost-Effective Than Manual Total Hip Arthroplasty: A Markov Model Analysis. *J Am Acad Orthop Surg*. 2021 Feb 15;29(4):e168-e177. doi: 10.5435/JAAOS-D-20-00498. PMID: 32694323.
- Ong CB, Buchan GBJ, Acuña AJ, et al. Cost-effectiveness of a novel, fluoroscopy-based robotic-assisted total hip arthroplasty system: a Markov analysis. *Int J Med Robot*. 2024;e2582. <https://doi.org/10.1002/rcs.2582>
70. Khanna, Omaditya MD; Beasley, Ryan PhD; Franco, Daniel MD; DiMaio, Simon PhD. The Path to Surgical Robotics in Neurosurgery. *Operative Neurosurgery* 20(6):p 514-520, May 2021. | DOI: 10.1093/ons/opab065
71. By applying robotic and semi-autonomous technology, the goal is to reduce errors in registration and increase accuracy; this becomes especially important in cases like asleep implantation of deep brain stimulators. With the addition of intraoperative imaging, the surgeon can account for small changes in the surgical field and adjust surgical planning in real time, and integration with robotic assistance provides a more seamless and smooth experience as compared to previous frame-based techniques.
72. Łajczak, P.M, Jurek, B, Józwiak, K. et al. Bridging the gap: robotic applications in cerebral aneurysms neurointerventions - a systematic review. *Neurosurg Rev* 47, 150 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10143-024-02400-5>
73. Słowiński J, Żurek M, Wypych-Ślusarska A, Krupa-Kotara K, Oleksiuk K, Głogowska-Ligus J, Koziół A, Koziół-Rostkowska M. Risk factors for reoperation after surgical treatment for degenerative spinal disease in Poland: a nationwide retrospective study of 38,953 hospitalisations. *Neurol Neurochir Pol*. 2023;57(4):352-362. doi: 10.5603/PJNNS.a2023.0040. Epub 2023 Jun 22. PMID: 37345748.
74. Good CR, Orosz L, Schroerlucke SR, Cannestra A, Lim JY, Hsu VW, Zahrawi F, Villalobos HJ, Ramirez PM, Sweeney T, Wang MY. Complications and Revision Rates in Minimally Invasive Robotic-Guided Versus Fluoroscopic-Guided Spinal Fusions: The MIS ReFRESH Prospective Comparative Study. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2021 Dec 1;46(23):1661-1668. doi: 10.1097/BRS.0000000000004048. PMID: 33826591; PMCID: PMC8565511.

75. Sorayouth Chumnanvej, Krish Ariyaparakai, Branesh M. Pillai, Jackrit Suthakorn, Sharvesh Gurusamy, Siriluk Chumnanvej. Cost-effectiveness of robotic-assisted spinal surgery: A single-center retrospective study, *Laparoscopic, Endoscopic and Robotic Surgery*, Volume 6, Issue 4, 2023, Pages 147-153, ISSN 2468-9009, <https://doi.org/10.1016/j.lers.2023.11.004>.
- Menger RP, Savardekar AR, Farokhi F, Sin A. A Cost-Effectiveness Analysis of the Integration of Robotic Spine Technology in Spine Surgery. *Neurospine*. 2018 Sep;15(3):216-224. doi: 10.14245/ns.1836082.041. Epub 2018 Aug 29. PMID: 30157583; PMCID: PMC6226125.
76. Naila H. Dhanani, Oscar A. Olavarria, Karla Bernardi, et al. The Evidence Behind Robot-Assisted Abdominopelvic Surgery: A Systematic Review. *Ann Intern Med*. 2021;174:1110-1117. [Epub 29 June 2021]. doi:10.7326/M20-7006
77. Childers CP, Maggard-Gibbons M. Estimation of the Acquisition and Operating Costs for Robotic Surgery. *JAMA*. 2018;320(8):835-836. doi:10.1001/jama.2018.9219

