

# Synchronizacja z ruchem pacjenta w tomoterapii

Jakub Reguła

TMS Sp. z o.o., e-mail: jakub.regula@tms.com.pl

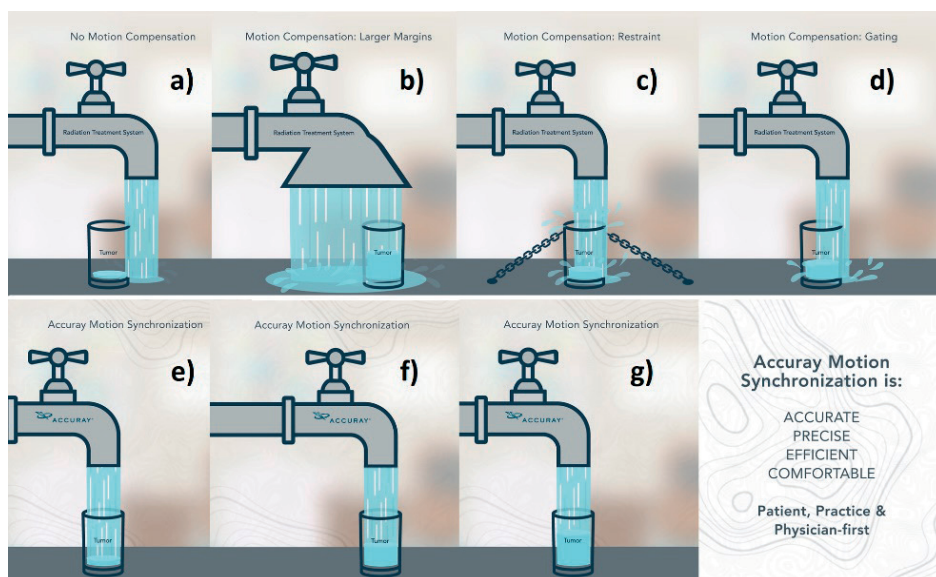
Radixact to najmłodsze urządzenie z rodziny tomoterapii. Zostało zaprojektowane zgodnie z filozofią Accuray, która kładzie nacisk na to, by napromienianie podążało za pacjentem, a nie na odwrót. Zarówno ruch oddechowy, jak i przypadkowe ruchy mają duży wpływ na dokładność przeprowadzonej terapii. Teraz technologia synchronizacji dostępna wcześniej w urządzeniach CyberKnife jest dostępna również w tomoterapii Radixact.

Ruch pacjenta związany z oddechem i czynnościami fizjologicznymi jest jednym z największych wyzwań wpływających na dokładność przeprowadzonej radioterapii. Ruch oddechowy często wymusza stosowanie dużych marginesów (Rys. 1), a także wpływa na dokładność dozymetryczną, gdy poruszający się guz jest otoczony tkanką o niskiej gęstości lub gdy wraz z ruchem zmienia się grubość tkanki na drodze wiązki promieniowania. Na przestrzeni lat klasyczne urządzenia do napromieniania wyposażano w specjalne układy obrazowania i bramkowania, a także stosowano bardzo duże marginesy napromieniania.



**Rys. 1** Zastosowanie małego (5 mm) marginesu powoduje podwojenie napromienianej objętości. Analogicznie, im mniejszy margines, tym mniejsza objętość napromieniana. Objętość skórki pomarańczy jest równa objętości miąższu

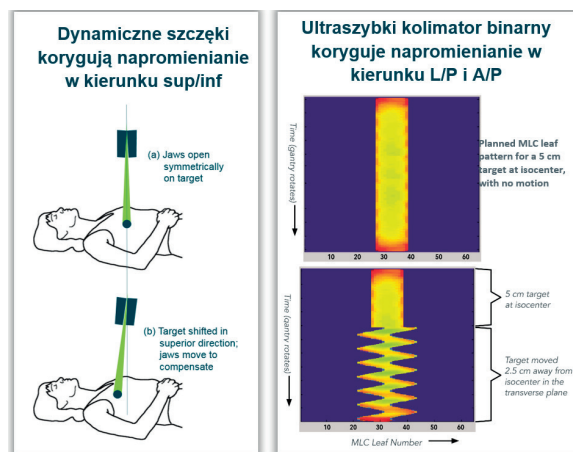
Porównanie podstawowych sposobów radzenia sobie z problemem zaprezentowano na rysunku 2. Poruszająca się szklanka symbolizuje obszar napromieniania, a kran i woda przedstawiają system napromieniania i dawkę. Jeżeli ruch guza nie jest



**Rys. 2** Graficzne przedstawienie problemu napromieniania poruszającego się targetu. Szklanka przesuwająca się względem nieruchomego systemu napromieniania (kranu): (a) brak kompensacji ruchu, (b) duży margines, (c) ograniczenie ruchomości guza, (d) gating. System napromieniania Radixact synchronizuje ruch z ruchem (e-g). Pełna animacja dostępna jest pod linkiem ukrytym w kodzie QR

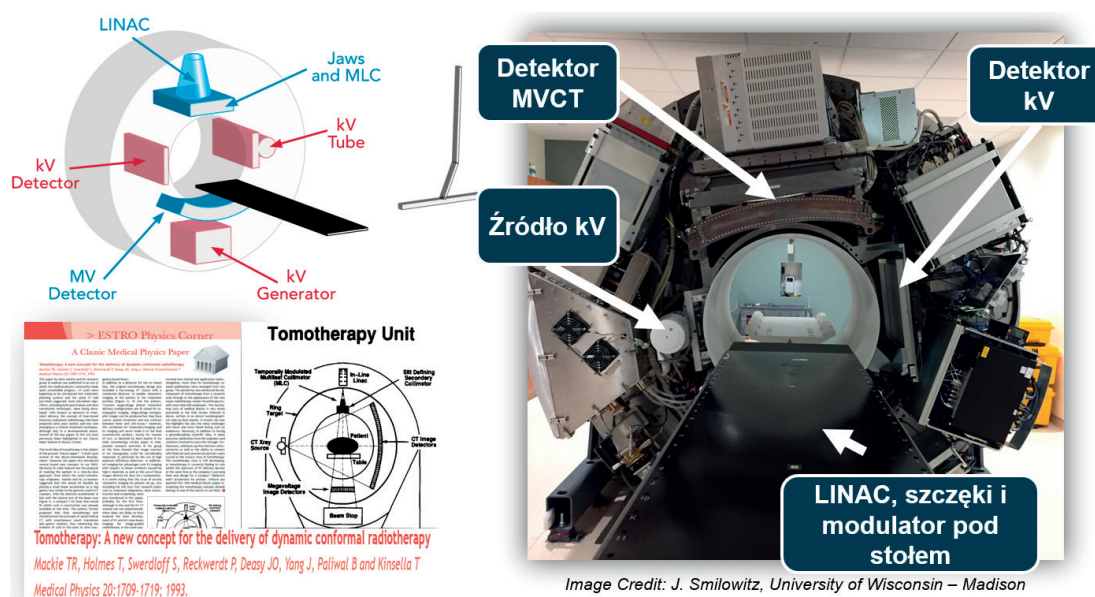
w żaden sposób uwzględniany, wówczas połowa wody (dawki) nie trafi do poruszającej się szklanki i zostanie rozlana poza nią (a). Zastosowanie bardzo dużego marginesu uwzględniającego ruchomość (b) powoduje rozlanie dużej ilości wody dookoła szklanki. Cały obszar zdrowych tkanek znajdujący się w marginesie zostanie napromieniony. Jeżeli ruch pacjenta zostanie ograniczony (c), to i tak niemożliwe jest zapobieżenie małym ruchom. Stosowanie bramkowania oddechowego (gatingu) jest wyzwaniem zarówno dla sprzętu napromieniającego, jak i pacjenta. Włączenie i wyłączenie wiązki musi być szybkie i zależne od fazy oddechowej pacjenta, a sam pacjent musi oddychać w sposób powtarzalny i kontrolowany. Brak kontroli pozycji guza w fazach oddechowych podczas napromieniania powoduje, że w praktyce wiązka napromieniania w bramkowaniu oddechowym nie jest idealnie zgrana z pozycją guza – duża część wody jest rozlana poza szklankę. Wszystkie te rozwiązania są próbą dostosowania pacjenta lub układu formującego wiązkę do ograniczeń technicznych nieruchomego urządzenia napromieniającego – kranie może się poruszać. System Radixact pozwala na bieżąco synchronizować pozycję emitowanej wiązki napromieniania z poruszającym się obszarem napromieniania, eliminując konieczność stosowania dużych marginesów lub ograniczania ruchomości pacjenta. Pełna animacja przedstawiająca rozwiązanie tego problemu znajduje się pod adresem w kodzie QR.

Idea synchronizacji w systemie Radixact została zapożyczona z systemu CyberKnife, który od wielu lat umożliwia takie napromienianie. Zastosowano tę samą kamerę śledzącą ruch oddechu oraz analogiczne algorytmy pozwalające na zbudowanie modelu synchronizacji z ruchem i analizujące aktualną pozycję guza na zdjęciach weryfikacyjnych wykonywanych w trakcie terapii. Urządzenie wyposażono w system obrazowania rentgenowskiego, który co kilka sekund pozwala uzyskać aktualny obraz. Taki układ był już przewidziany w oryginalnej koncepcji z roku 1993.



Rys. 4 Korekcja i synchronizacja pozycji wiązki z obszarem napromieniania w urządzeniu Radixact [1]

Pojawiło się pytanie: czy taki układ formowania wiązki, jaki zastosowano w tomoterapii, może aktywnie kontrolować pozycję wiązki i synchronizować ją z pozycją guza? Przeprowadzone badania wykazały, że tak [1]. Ultraszybki kolimator binarny umożliwia korygowanie pozycji wiązki w kierunku bocznym, a ruchome szczęki w kierunku głowa – stopy (por. Rys. 4). Pozostało jeszcze pytanie, czy tak zsynchronizowana wiązka pozwala zapobiec niedokładnościom dozymetrycznym napromieniania. Podzielono problem na dwa zagadnienia. Pierwszym była synchronizacja z ruchem obszaru napromieniania związanym z oddechem. Taki ruch można obserwować za pomocą kamery, a odpowiedni algorytm tworzy model synchronizacji pomiędzy ruchem klatki piersiowej a ruchem guza, obserwowanym na obrazach planarnych. W trakcie napromieniania poprawność modelu jest na bieżąco sprawdzana poprzez porównanie obrazów planarnych z teoretyczną pozycją guza wyznaczoną w modelu.

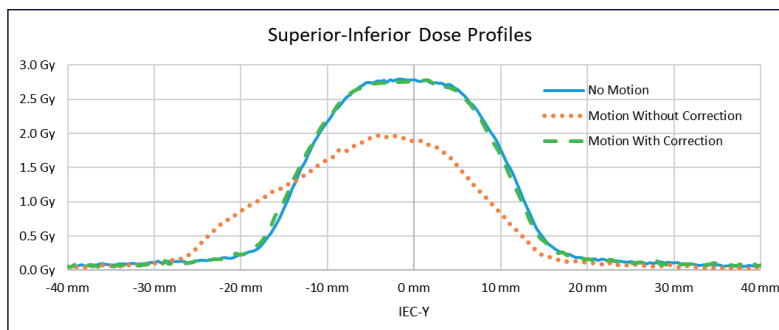


Rys. 3 Koncepcja tomoterapii – artykuł z 1993 roku i wnętrze najnowszego urządzenia Radixact

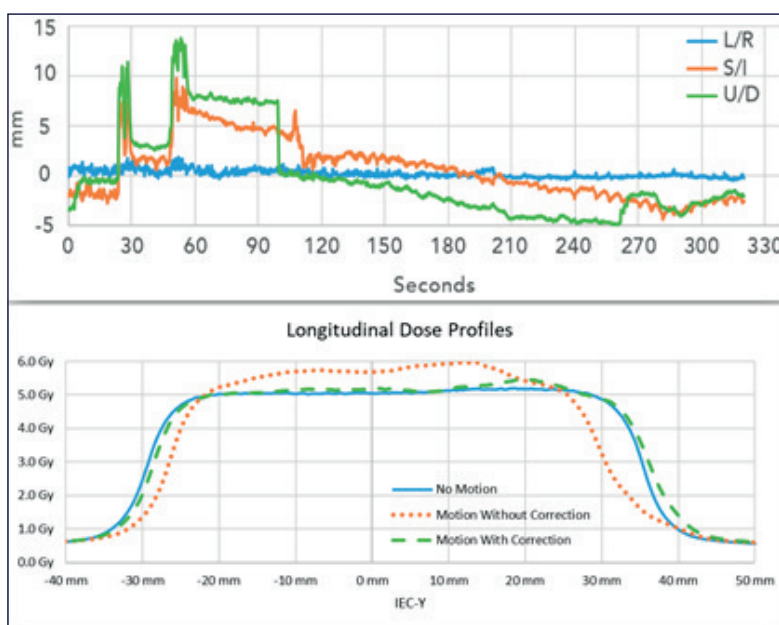
Wynik porównania rozkładów dawki napromieniania uzyskanych bez uwzględnienia i z uwzględnieniem ruchomości oddechowej przedstawiono na rysunku 5.

Drugim zagadnieniem była kompensacja ruchu przypadkowego wynikająca z czynności fizjologicznych. Najlepszym przykładem takiego przypadkowego ruchu jest ruch prostaty w trakcie napromieniania. Prostate może poruszać się w sposób przypadkowy aż do 1,5 cm w krótkich odstępach czasu. Zapis ruchu prostaty z systemu Calypso (Varian) został odtworzony na fantomie, aby zasymulować ruch przypadkowy. Na rysunku 6 przedstawiono zapis ruchu prostaty oraz wynik pomiarów rozkładu dawki z i bez kompensacji tego ruchu za pomocą szczęk i listków kolimatora.

Badania możliwości realizacji synchronizacji z ruchem w urządzeniu Radixact wykazują, że rozkład dawki w napromienianym obszarze jest najlepiej dopasowany do oryginalnego rozkładu dawki z planu, gdy ruch oddechowy i przypadkowy są uwzględniane i korygowane na bieżąco w trakcie napromieniania. Publikowane pierwsze wyniki zastosowania synchronizacji Radixact w praktyce klinicznej są bardzo obiecujące i potwierdzają, że technologia ta jest bardzo dużym i bardzo ważnym krokiem w rozwoju techniki napromieniania, pozwalając na napromienienie z najwyższą precyzją obszarów o dużej dawce frakcyjnej bez konieczności stosowania dodatkowych marginesów związanych z ich ruchomością. <sup>B</sup>



**Rys. 5.** Porównanie profili rozkładu dawki w kierunku głowa-stopy. Niebieska linia – brak ruchu (oryginalny rozkład dawki w planie). Pomarańczowe kropki – napromienianie bez synchronizacji oddechowej. Zielone kreski -- napromienianie ruchomego obszaru wraz z zastosowaniem synchronizacji



**Rys. 6** Góra: zapis ruchu prostaty w czasie leczenia, pochodzący z systemu Calypso. Dół: niebieska linia – rozkład dawki w oryginalnym planie leczenia prostaty, pomarańczowe kropki – rozkład dawki w napromienianiu poruszającej się prostaty bez korekcji wiązki, zielone kreski – rozkład dawki w napromienianiu z synchronizacją pozycji wiązki [2]

## Literatura

1. E. Schnarr et al.: *Feasibility of real-time motion management with helical tomotherapy*, Med. Phys., 45(4), 2018, 1329-1337, doi: 10.1002/mp.12791.
2. E.H. Chao et al: *Evaluation of TomoTherapy dose calculations with intrafractional motion and motion compensation*, Med. Phys., 45(1), 2018, 18-28, doi: 10.1002/mp.12655.
3. A.T. Price et al.: *Compensation of intrafractional motion for lung stereotactic body radiotherapy (SBRT) on helical TomoTherapy*, Biomedical Physics & Engineering Express, 2019, 10.1088/2057-1976/ab059e.



Wyłączny dystrybutor firmy Accuray w Polsce:  
TMS Sp. z o.o., ul. Wiertnicza 84, 02-952 Warszawa