

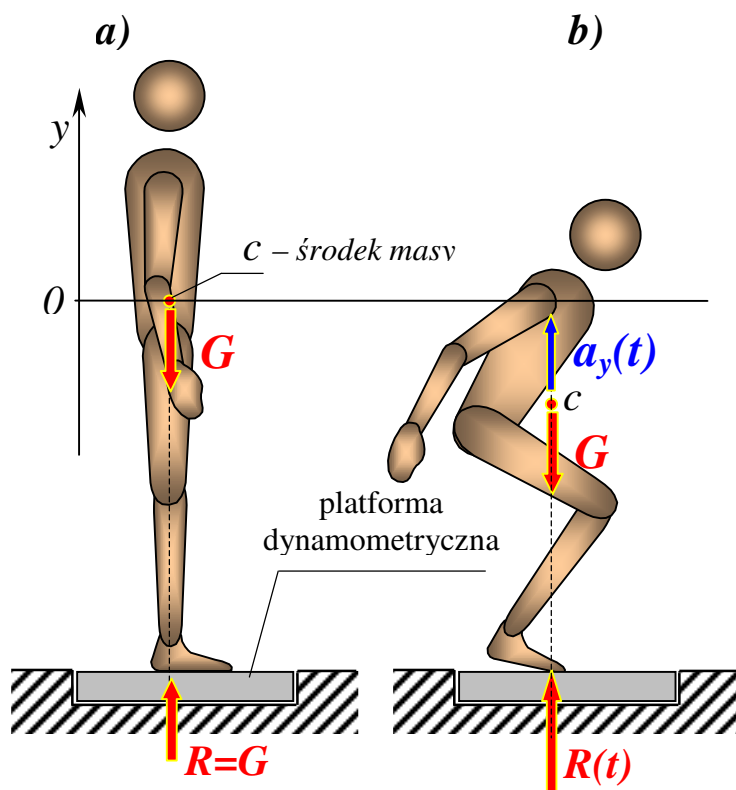
## Wyznaczanie parametrów biomechanicznych układu ruchu na podstawie zapisu reakcji podłoża podczas wyskoku CMJ

CMJ (*counter movement jump*) – wyskok pionowy z miejsca z zamachem

### 1. Wstęp

Pomiar reakcji podłoża podczas wyskoku pionowego pozwala na dokładną i obiektywną ocenę skoczności, łączącej elementy głównych cech motorycznych człowieka: mocy, szybkości i koordynacji ruchowej<sup>1</sup>. W formalnie ścisły sposób umożliwia wyznaczenie takich wielkości jak prędkość odbicia, praca odbicia, moc maksymalna i średnia moc mechaniczna generowana przez układ ruchu. Metoda pozbawiona jest wad testu Sargenta (świadome lub nieświadome zaniżanie wysokości, brak możliwości pomiaru wysokości uniesienia środka masy), czy metody oceny wysokości wyskoku na podstawie oceny czasu lotu (sztuczne wydłużenie czasu lotu przez podkurczenie kolan przy lądowaniu). Poza tym na podstawie dwu ostatnich metod nie można wyznaczyć dokładnie ani mocy generowanej przez mięśnie ani pracy wykonanej podczas wyskoku.

### 2. Podstawy teoretyczne



Rys.1. Siły zewnętrzne działające na człowieka podczas wyskoku CMJ

Siłami zewnętrznymi<sup>2</sup>, które działają na człowieka podczas wyskoku pionowego są:

- ciężar ciała  $G$ [N] (siła ciężkości) przyłożony w środku masy (środku ciężkości)  $c$

$G=mg$ ,  $m$ [kg] – masa ciała

$g=9.81$ [m/s<sup>2</sup>] – przyspieszenie ziemskie

- pionowa siła reakcji podłoża  $R(t)$ [N], będąca w ogólnym wypadku funkcją czasu  $t$ , przyłożona w punkcie styku stóp z podłożem<sup>3</sup> (rys.1).

Siły te, zgodnie z II zasadą dynamiki Newtona oraz twierdzeniem o ruchu środka masy<sup>4</sup>, powodują ruch *środku masy* z pionowo skierowanym przyspieszeniem  $a_y$ [m/s<sup>2</sup>]

$$a_y = \frac{R(t) - G}{m} = \frac{R(t)}{m} - g \quad 1)$$

Tutaj i dalej przyjmujemy, że wielkości wektorowe (siła, prędkość, przyspieszenie) mają

<sup>1</sup> Wit A. (red): *Biomechaniczna ocena układu ruchu sportowca*, Instytut Sportu, Warszawa 1992

<sup>2</sup> Siły zewnętrzne to siły działające na obiekt ze strony otoczenia. Siły wewnętrzne to siły oddziaływania między elementami obiektu. Podział na siły wewnętrzne i zewnętrzne zależy od sposobu poprowadzenia granicy pomiędzy obiektem i otoczeniem.

<sup>3</sup> Ponieważ w rzeczywistości stopy stykają się z podłożem na pewnej powierzchni, chodzi tutaj o punkt przyłożenia wypadkowej siły reakcji.

<sup>4</sup> Środek masy układu punktów materialnych porusza się tak, jakby w tym punkcie była skupiona cała masa układu i jakby do tego punktu przyłożone były wszystkie siły zewnętrzne.

wartość dodatnią, jeśli zwrócone są w górę (zgodnie z przyjętym dodatnim zwrotem osi  $y$ ) oraz ujemną, gdy są zwrócone w dół (stąd w równaniu 1 ujemna wartość siły ciężkości  $G$ ).

Z równania 1 wynika wartość reakcji podłoża

$$R(t) = G + ma_y \quad 2)$$

Istnieje zatem jednoznaczny związek między przyspieszeniem  $a_y$  środka masy i wartością  $R$  reakcji podłoża, która może być mniejsza, większa lub równa ciężarowi ciała. W przypadku nieruchomej pozycji, kiedy to przyspieszenie środka masy  $a_y=0$ , siła reakcji podłoża równa jest ciężarowi  $R=G$  (rys.1a). Przy jakimkolwiek ruchu środka masy w kierunku pionowym siła reakcji podłoża zmienia się (jest funkcją czasu – rys.1b):

- przy przyspieszeniu  $a_y>0$  (w górę)  $R>G$ ,
- przy przyspieszeniu  $a_y<0$  (w dół)  $R<G$ .

Znając  $R(t)$  i masę ciała  $m$  obliczyć można przyspieszenie  $a_y$  (wzór 1) a następnie, przyjmując warunki początkowe ruchu: prędkość  $v_{0y}$  oraz położenie  $y_0$  w chwili  $t=0$ , prędkość  $v_y$  [m/s] (wzór 3) i położenie  $y$  [m] (wzór 4) środka masy w dowolnej chwili  $t$

$$v_y(t) = v_{0y} + \int_0^t a_y dt \quad 3)$$

$$y(t) = y_0 + \int_0^t v_y dt \quad 4)$$

Moc mechaniczną  $P$  [W] generowaną przez mięśnie człowieka oblicza się na podstawie zależności

$$P(t) = R(t)v_y(t) \quad 5)$$

zaś pracę przez nie wykonaną (wydatkowaną energię) w fazie odbicia<sup>5</sup>  $\langle t_2, t_3 \rangle$

$$E = \int_{t_2}^{t_3} P(t) dt \quad 6)$$

Pracę odbicia obliczyć można również wychodząc z bilansu energetycznego

$$E = G(y_{\max} - y_{\min}) = G(y_{odb} - y_{\min}) + \frac{1}{2} m v_{odb}^2 \quad 7)$$

zaś średnią moc odbicia oblicza się na podstawie wzoru

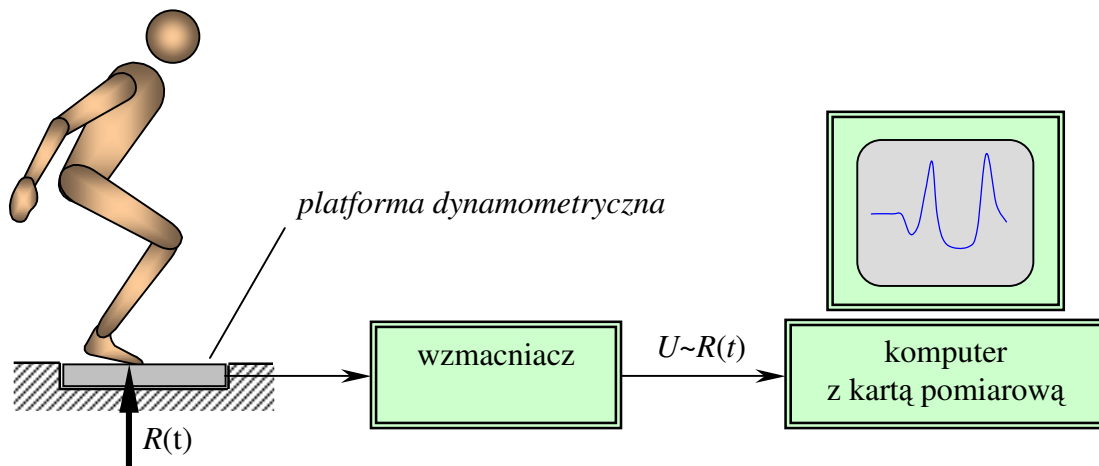
$$P_{sr} = \frac{E}{\Delta t_{odb}} \quad 8)$$

Oznaczenia występujące we wzorach 7 i 8 wyjaśnione są w dalszej części opracowania.

---

<sup>5</sup> patrz dalej

Urządzeniem służącym do pomiaru siły reakcji podłoża  $R$  w funkcji czasu jest *platforma dynamometryczna*<sup>6</sup>. Sygnał analogowy, w postaci napięcia  $U$  o wartości proporcjonalnej do wielkości reakcji, podawany jest, poprzez wzmacniacz, na wejście karty pomiarowej umieszczonej w komputerze (rys.2). Sygnał ten jest zamieniany na postać cyfrową, umożliwiającą jego dalszą obróbkę numeryczną. Następnie jest on z odpowiednią częstotliwością (np. 100 razy na sekundę) próbkowany<sup>7</sup> i zapisywany w pamięci komputera co umożliwia jego dalszą obróbkę numeryczną.



Rys.2. Schemat toru pomiarowego

Na rys.3 przedstawiono przebiegi w funkcji czasu  $t$  wartości:

- reakcji podłoża  $R$ ,
- prędkości  $v_y$  środka masy w kierunku pionowym,
- pionowego położenia  $y$  środka masy,
- mocy  $P$  generowanej przez mięśnie,

dla przykładowego wyskoku. Pokazana jest również schematyczna sylwetka człowieka w charakterystycznych dla wyskoku pionowego chwilach. Strzałki obok sylwetki symbolizują prędkość środka masy.

Cały proces wyskoku podzielić można na 5 faz. Podział ten przeprowadzony jest ze względu na charakterystyczne dla poszczególnych faz wartości położenia i prędkości środka ciężkości oraz przebieg reakcji podłoża.

### 1. Faza statyczna

Człowiek stoi nieruchomo. Przyspieszenie środka masy  $a_y=0$ , w związku z czym wartość reakcji podłoża  $R=G$ . Położenie środka masy nie zmienia się ( $v_y=0$ ). Rozpoczęcie analizy wyskoku od fazy statycznej konieczne jest z uwagi na łatwe wyznaczenie warunków początkowych ruchu występujących we wzorach 3 i 4: początkowa prędkość środka masy  $v_{0y}=0$ , początkowe położenie środka masy  $y_0=0$  (tam, gdzie znajduje się środek masy człowieka w fazie statycznej przyjmuje się  $y=0$  nie wiedząc w istocie, gdzie leży ten punkt w stosunku do ciała człowieka).

<sup>6</sup> urządzenie do pomiaru siły nacisku (rodzaj wagi)

<sup>7</sup> próbkowanie polega na cyklicznym odczycie wartości sygnału

## 2. Faza zamachu

Rozpoczyna się z chwilą  $t_1$ , w której człowiek zaczyna wykonywać jakikolwiek ruch zapoczątkowujący wyskok. Początkowo siła reakcji podłoża  $R$  maleje ( $R < G$ ), co oznacza ujemne przyspieszenie środka masy (skierowane w dół). Następuje rozpędzanie w dół środka ciężkości aż do chwili, w której wartość reakcji podłoża  $R = G$  ( $a_y = 0$ ). Środek ciężkości ma wówczas największą prędkość w ruchu w dół. Od tego momentu rozpoczyna się hamowanie. Siła reakcji podłoża  $R > G$ , przyspieszenie zatem staje się dodatnie (skierowane w górę). Wartość prędkości środka ciężkości zmniejsza się. Stan ten trwa do chwili  $t_2$ , w której ruch w dół jest całkowicie wyhamowany ( $v_y = 0$ ). Środek ciężkości zajmuje wówczas najniższe położenie  $y_{min}$ . Jest to koniec fazy zamachu. Czas  $\Delta t_{zam} = t_2 - t_1$  nazywamy *czasem zamachu*.

## 3. Faza odbicia

Z chwilą  $t_2$  (końcem fazy zamachu) rozpoczyna się faza odbicia. W dalszym ciągu  $R > G$ , a zatem przyspieszenie środka ciężkości jest dodatnie i narasta jego prędkość skierowana w górę. Maksymalną wartość osiąga ona w chwili poprzedzającej oderwanie stóp od platformy i od tego momentu zaczyna nieznacznie spadać. W chwili  $t_3$  następuje oderwanie stóp od podłoża i wartość reakcji  $R$  spada do zera. Prędkość  $v_{odb}$ , jaką w chwili oderwania stóp od podłoża posiada środek ciężkości, zwana jest *prędkością odbicia*. Środek masy zajmuje wówczas położenie oznaczone przez  $y_{odb}$ , nieco wyższe, niż w 1 fazie. Z chwilą  $t_3$  kończy się faza odbicia. Czas  $\Delta t_{odb} = t_3 - t_2$  nazywamy *czasem odbicia*. Sumę czasów zamachu i odbicia nazywamy *czasem wyskoku*.

## 4. Faza lotu

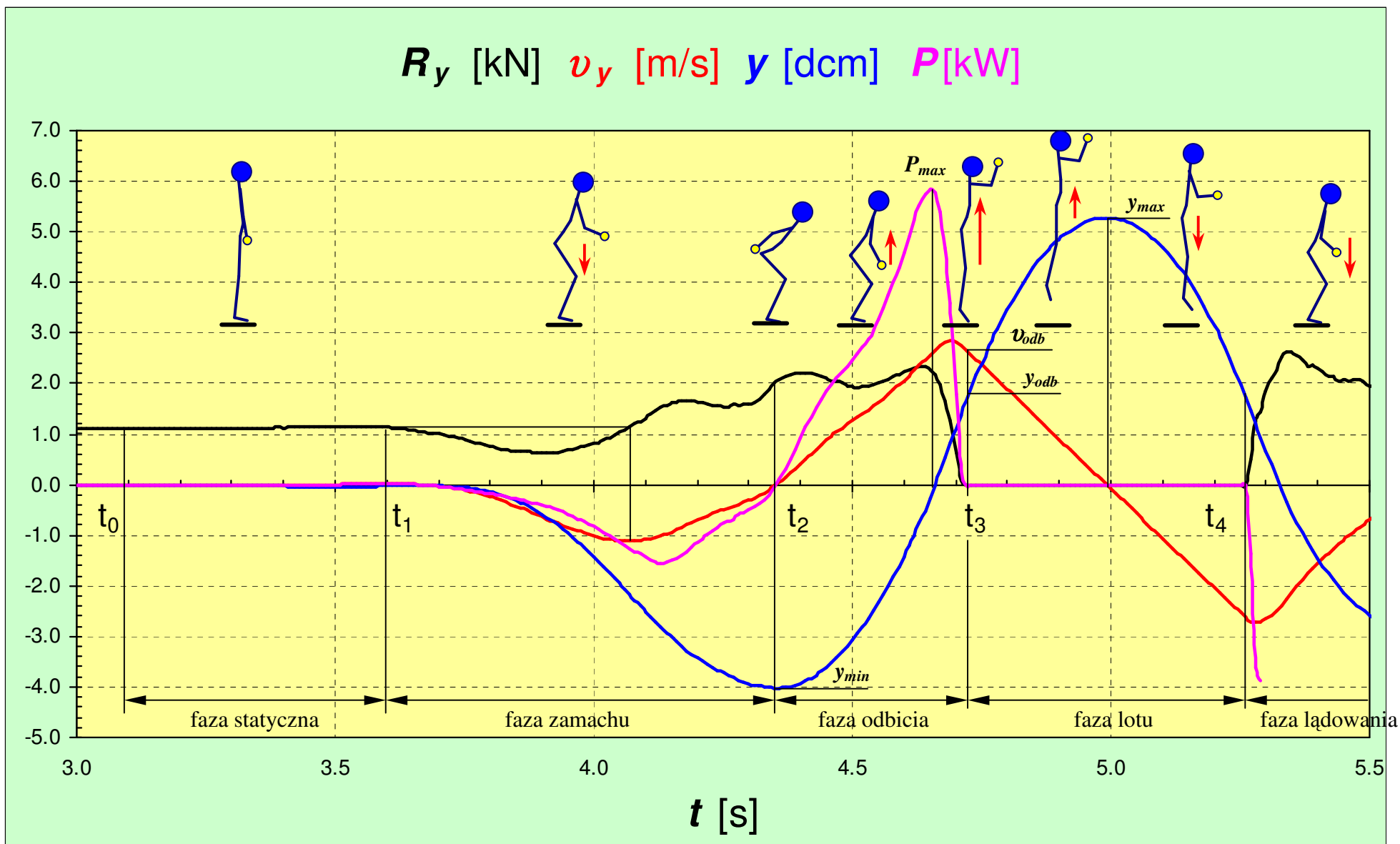
W fazie tej człowiek poddany jest działaniu jedynie siły ciężkości  $G$  (opór powietrza można pominąć). Środek ciężkości porusza się zatem ruchem jednostajnie opóźnionym (przy dodatnim zwrocie osi  $y$  w górę). Jego prędkość liniowo maleje, zaś położenie zmienia się parabolicznie w funkcji czasu: początkowo wzrasta, a następnie maleje. Najwyższe położenie  $y_{max}$  środek ciężkości uzyskuje mniej więcej w połowie czasu trwania fazy lotu. Prędkość wówczas równa jest zeru. Od tego momentu zaczyna się opadanie: prędkość staje się ujemna (skierowana w dół). Faza lotu trwa do chwili  $t_4$  powtórnego zetknięcia się stóp z podłożem. Czas  $\Delta t_{lot} = t_4 - t_3$  nazywamy *czasem lotu*. Na podstawie czasu lotu możliwe jest oszacowanie wysokości uniesienia środka masy (różnicy między położeniem maksymalnym  $y_{max}$  a położeniem w chwili odbicia  $y_{odb}$ )

$$y_{max} - y_{odb} = \frac{1}{2} g \left( \frac{\Delta t_{lot}}{2} \right)^2 \quad 9)$$

Wzór 9 daje dokładny wynik, jeśli czas wznoszenia równy jest czasowi opadania (położenie środka masy w chwili  $t_3$  i  $t_4$  będzie jednakowe). W ogólnym przypadku tak nie jest z uwagi na możliwość innej konfiguracji ciała przy lądowaniu (np. mocniej ugięte kolana) niż przy odbiciu.

## 5. Faza lądowania

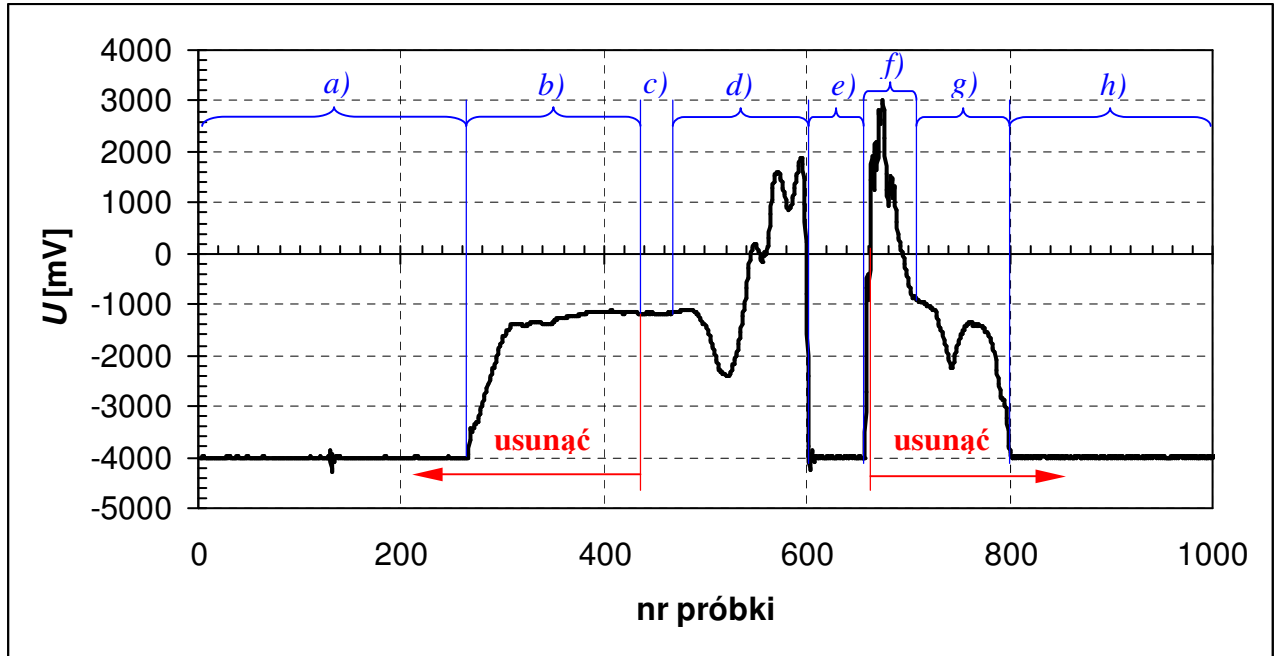
Rozpoczyna się z końcem fazy lotu – od chwili  $t_4$ .



Rys.3. Przykładowy przebieg parametrów wyskoku CMJ w funkcji czasu

### 3. Opracowanie danych pomiarowych

Dane wyjściowe do obliczeń stanowi plik tekstowy \*.asc, zawierający w pierwszej linii tekst informacyjny (np. dane osoby wykonującej wyskok) oraz 2 kolumny liczb: numer próbki oraz wartość napięcia  $U$ [mV] zarejestrowanego na wejściu karty pomiarowej. Na rys.4 pokazano przykładowy przebieg napięcia w funkcji numeru próbki (tzw. wykres „surowy”)



Rys.4. Przykładowy przebieg napięcia w funkcji numeru próbki przy wyskoku CMJ – dane „surowe”

W celu opracowania danych pomiarowych wygodnie jest posłużyć się arkuszem kalkulacyjnym. Zakładamy, że będzie to Microsoft Excel.

Wykonujemy czynności zgodnie z zaproponowanym poniżej schematem.

#### Krok 1 – wczytanie danych do arkusza kalkulacyjnego

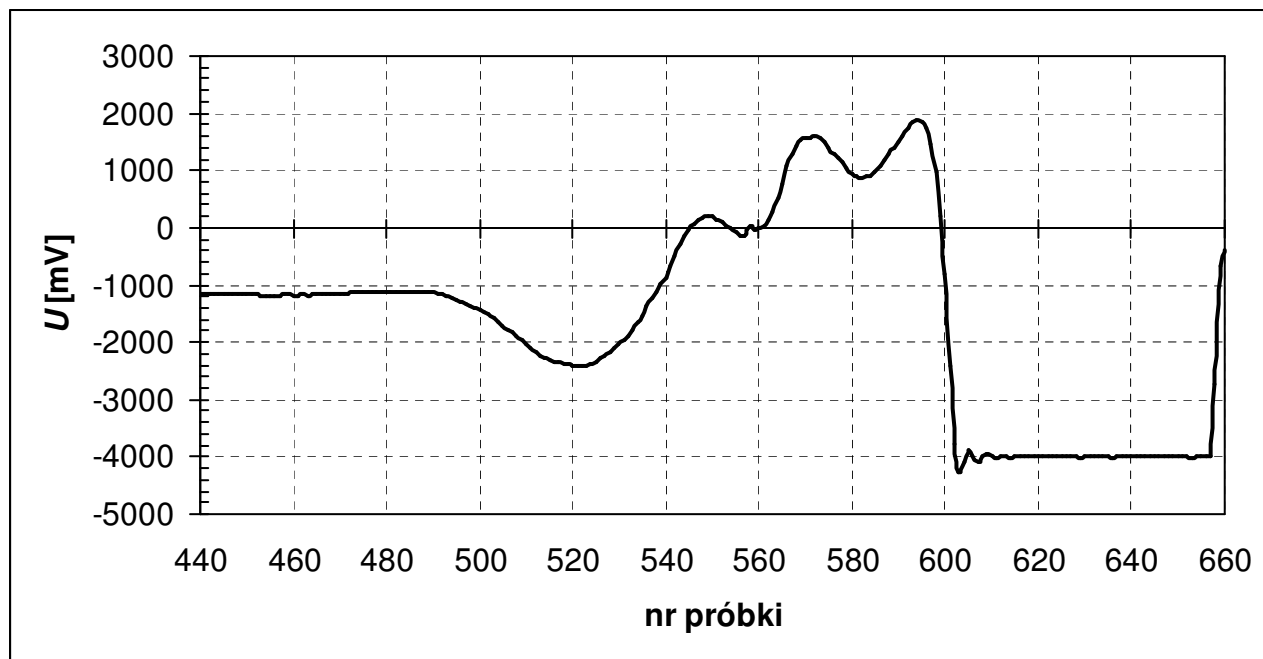
Dane z pliku tekstowego przenosimy do arkusza kalkulacyjnego. Nadajemy plikowi nazwę i zapisujemy go już jako *Skoroszyt Microsoft Excel (\*.xls)*. Wykonujemy wykres napięcia w funkcji numeru próbki jak na rys.4.

#### Krok 2 – usunięcie zbędnych danych

Na podstawie pokazanego wykresu można odtworzyć historię pomiaru:

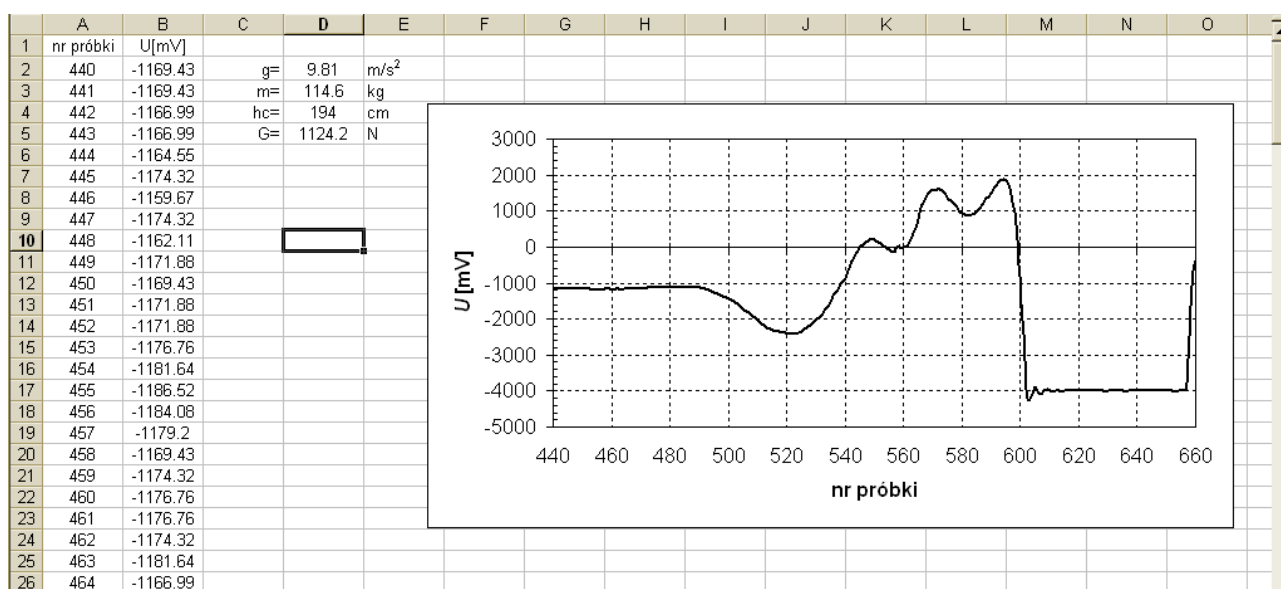
- platforma nie obciążona,
- wejście badanego na platformę,
- faza statyczna,
- faza zamachu i odbicia,
- faza lotu,
- uderzenie o platformę przy lądowaniu,
- zejście z platformy,
- platforma nie obciążona,

Należy usunąć zbędne dane: do początku fazy statycznej oraz od końca fazy lotu do końca<sup>8</sup>. Po przeskalowaniu osi poziomej wykres przybierze postać pokazaną na rys.5.



Rys.5. Dane „surowe” po usunięciu zbędnych próbek

W pierwszym wierszu wpisujemy nagłówki kolumn z danymi: *nr próbki*, *U[mV]*. W wybranych komórkach wpisujemy dane badanego zawodnika: masę ciała  $m$ [kg] i wysokość ciała  $h_c$ [cm]. Podajemy ponadto wartość przyspieszenia ziemskiego  $g=9.81$ [m/s<sup>2</sup>] i obliczamy ciężar ciała  $G=m \cdot g$ [N]. Po wykonaniu tych czynności arkusz Excela może mieć wygląd pokazany na rys.6.



Rys.6. Przykładowy wygląd arkusza kalkulacyjnego Excel po wstępnym przygotowaniu danych

<sup>8</sup> Po zakończeniu fazy lotu należy zachować kilka punktów, aby koniec fazy lotu był dobrze widoczny.

### Krok 3 – przeskalaowanie wykresu

Na tym etapie pracy dysponujemy danymi w postaci napięcia w funkcji numeru próbki. W celu wyznaczenia wielkości zgodnie ze wzorami 3–8 musimy dysponować danymi w postaci siły reakcji w funkcji czasu  $R(t)$ . Aby to uzyskać wykres pokazany na rys.5 należy odpowiednio przeskalaować.

#### przeskalowanie osi pionowej

$$U[\text{mV}] \rightarrow R[\text{N}]$$

Zakładamy, że napięcie  $U[\text{mV}]$  na wejścia karty pomiarowej komputera jest proporcjonalne do mierzonej reakcji  $R[\text{N}]$ , a co za tym idzie, reakcja jest liniową funkcją napięcia

$$R = aU + b \quad 10)$$

gdzie  $a[\text{N/mV}]$  i  $b[\text{N}]$  są stałymi współczynnikami skalującymi. Aby je wyznaczyć musimy znać wartość napięcia i odpowiadającą mu wartość reakcji w dwóch dowolnych punktach wykresu. Wykorzystujemy w tym celu następujące informacje:

- w fazie statycznej  $R=G$ ,
- w fazie lotu  $R=0$ ,

Pozwala to na napisanie układu równań

$$\left. \begin{aligned} G &= aU_{st} + b \\ 0 &= aU_{lot} + b \end{aligned} \right\} \quad 11)$$

z którego wyznaczamy poszukiwane współczynniki

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{G}{U_{st} - U_{lot}} \\ b &= -aU_{lot} \end{aligned} \right\} \quad 12)$$

gdzie:  $U_{st}$  [mV] – średnia wartość napięcia w fazie statycznej,  $U_{lot}$  [mV] – średnia wartość napięcia w fazie lotu,  $G$  [N] – ciężar ciała.

Należy zatem określić zakres komórek odpowiadający fazie statycznej (w podanym przykładzie od próbki nr 440 do próbki nr 470) i obliczyć średnią wartość napięcia odpowiadającą temu zakresowi (w przykładzie  $U_{st}=-1170.54[\text{mV}]$ ). Podobnie określamy zakres komórek odpowiadających fazie lotu i obliczamy średnią wartość napięcia w tym zakresie (w przykładzie od próbki nr 602 do próbki nr 657,  $U_{lot}=-4000.29[\text{mV}]$ ). Wartości współczynników obliczamy zgodnie ze wzorami 12. Średnie wartości napięć oraz wartości współczynników skalujących obliczamy w wybranych komórkach arkusza. Dla zwiększenia czytelności komórki w podanych zakresach lub czcionkę w nich można wyróżnić innym kolorem.



### przeskalowanie osi poziomej numer próbki $\rightarrow t[s]$

Każdej z próbek przyporządkowujemy czas  $t[s]$  zgodnie ze wzorem

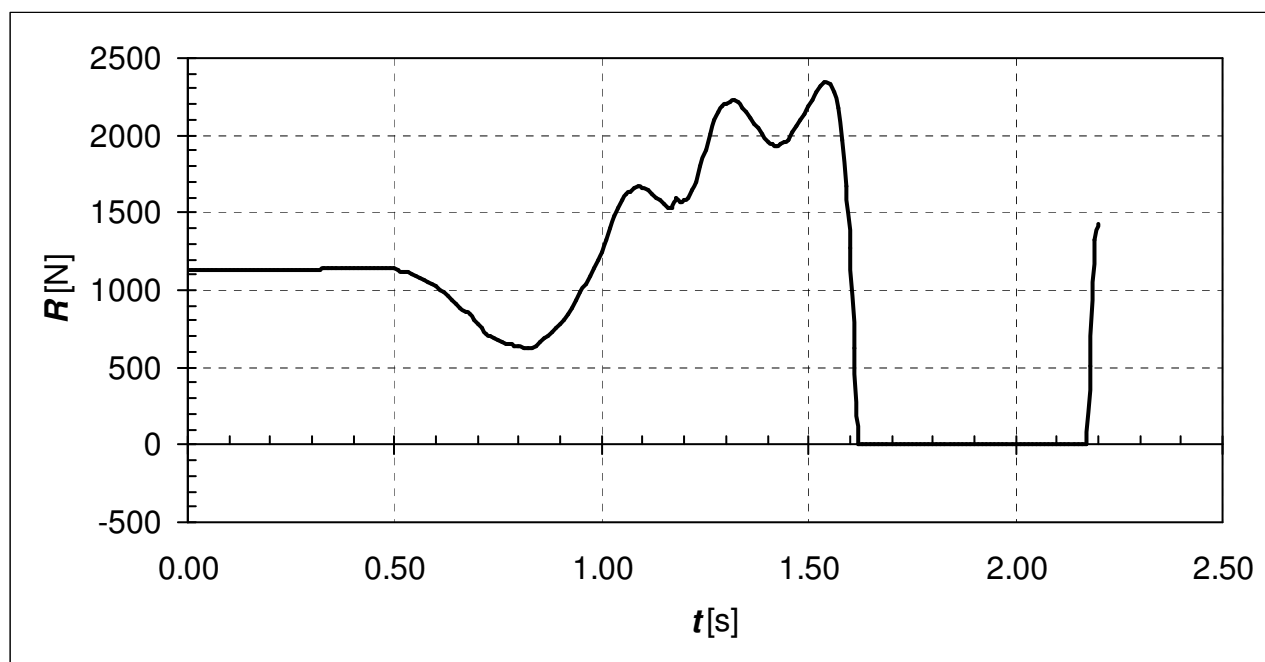
$$t = T_p (n - n_0) \quad (13)$$

gdzie:  $T_p[s]$  – okres próbkowania (czas między kolejnymi odczytami wartości napięcia na wejściu karty pomiarowej, odwrotność częstotliwości próbkowania),  $n$  – numer bieżącej próbki,  $n_0$  – numer próbki oznaczającej początek fazy statycznej.

Najprościej jest przypisać próbce oznaczającej początek fazy statycznej czas  $t=0$ , natomiast każdej następnej czas zwiększony o  $T_p$ .

Budujemy kolumny:  $t[s]$ ,  $R[N]$  obliczając wartości komórek zgodnie ze wzorami 13 i 10<sup>9</sup>. Wartości w kolumnie  $R$  ręcznie modyfikujemy: dla zakresu fazy statycznej wpisujemy wartości równe dokładnie ciężarowi  $G$ , zaś dla zakresu odpowiadającego fazie lotu wpisujemy wartości 0.

Wykonujemy wykres  $R(t)$  jak na rys.7



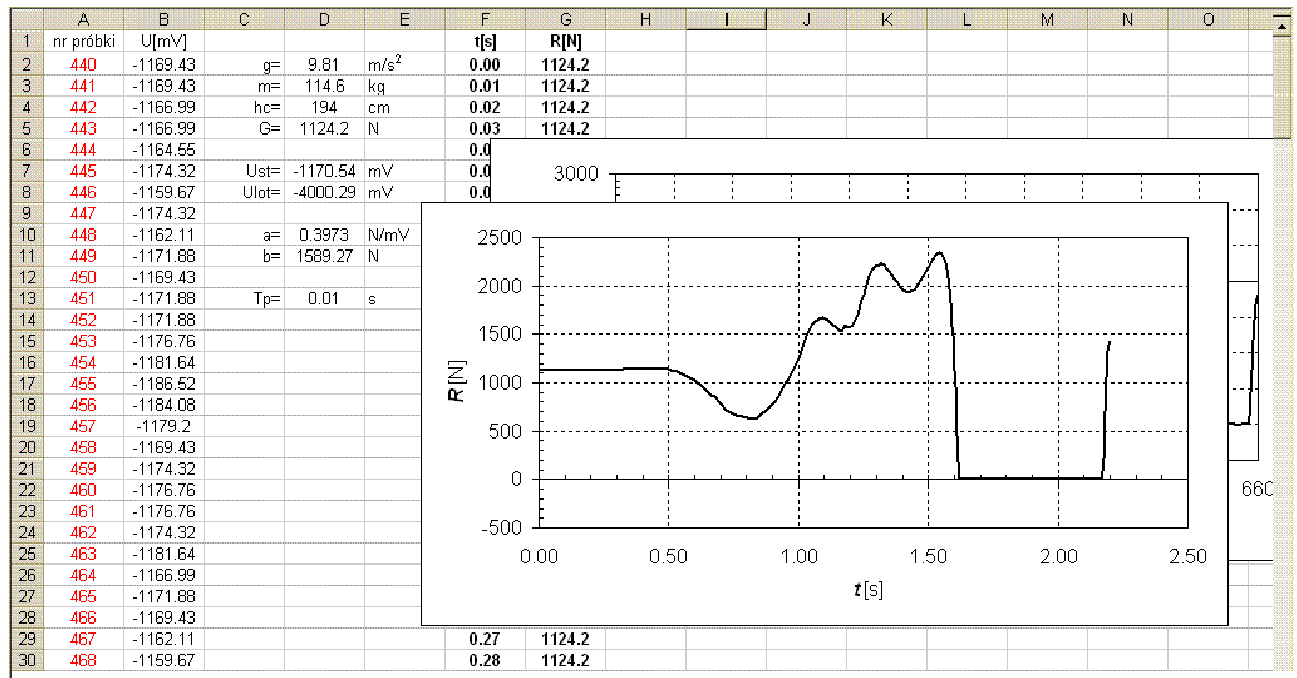
Rys.7. Przebieg reakcji podłoża w funkcji czasu podczas wyskoku CMJ

Po wykonaniu tych czynności arkusz przybiera postać pokazaną na rys.8.

#### Krok 4 – obliczenie przyspieszenia

W kolejnej kolumnie arkusza wpisujemy nagłówek  $a_y[m/s^2]$  i obliczamy wartości przyspieszenia w kolejnych chwilach zgodnie ze wzorem 1 (dla fazy statycznej powinniśmy otrzymać wartość 0, zaś dla fazy lotu  $-g$ ).

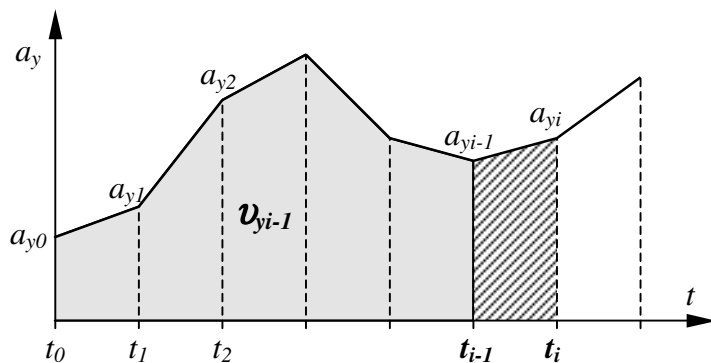
<sup>9</sup> Odpowiednie formuły wpisujemy tylko w pierwszych komórkach, w kolejnych kopiujemy je przeciągając myszką. Należy jednak pamiętać o poprzedzeniu znakiem \$ adresów komórek, których wartości mają być wstawiane do wzorów jako stałe.



Rys.8. Przykładowy wygląd arkusza kalkulacyjnego Excel po przeskalowaniu osi

### Krok 5 – obliczenie prędkości

W kolejnej kolumnie arkusza wpisujemy nagłówek  $v_y$ [m/s]. Prędkość środka masy obliczamy w oparciu o wzór 3. W pierwszej komórce wpisujemy 0 (zadana wartość prędkości początkowej  $v_{0y}$ ). Całka oznaczona występująca w tym wzorze obliczana jest jako pole pod krzywą przedstawiającą wartość przyspieszenia (rys.9).



Rys.9. Interpretacja wartości prędkości na podstawie przebiegu przyspieszenia w funkcji czasu

$$v_{yi} = v_{yi-1} + \frac{1}{2} (a_{yi} + a_{yi-1}) (t_i - t_{i-1}) \quad (14)$$

Odpowiednią formułę dla wzoru 14 wpisujemy w drugiej komórce kolumny prędkości. W przykładowych obliczeniach ma ona postać: =I2+(H3+H2)\*(F3-F2)/2. Wartości w pozostałych komórkach obliczamy automatycznie przez przeciągnięcie myszką.

### Krok 6 – obliczenie położenia

Położenie  $y$  środka masy obliczamy w ten sam sposób jak prędkość z tym, że zamiast przyspieszeniem operujemy prędkością

$$y_i = y_{i-1} + \frac{1}{2} (v_{y_i} + v_{y_{i-1}}) (t_i - t_{i-1}) \quad (15)$$

W pierwszej komórce kolumny położenia wpisujemy wartość 0 (położenie początkowe  $y_0$ ). W drugiej komórce wpisujemy formułę zgodnie ze wzorem 15. W przykładowych obliczeniach ma ona wartość:  $=J2+(I3+I2)*(F3-F2)/2$ . Wartości w pozostałych komórkach obliczamy automatycznie przez przeciągnięcie myszką.

### Krok 7 – obliczenie mocy

W kolejnej kolumnie wpisujemy nagłówek  $P[W]$ . Moc mechaniczną generowaną przez układ ruchu obliczamy w oparciu o wzór 5. W pierwszej komórce wpisujemy formułę (w przykładzie:  $=G2*I2$ ). Wartości w pozostałych komórkach obliczamy automatycznie przez przeciągnięcie myszką. W fazie statycznej i fazie lotu moc powinna wynosić 0.

### Krok 8 – wyznaczenie wartości wybranych parametrów wyskoku

W wybranych komórkach arkusza podajemy wartości:

- czasu  $t_1, t_2, t_3, t_4$  (patrz rys.3),
- czasu trwania fazy: zamachu  $\Delta t_{zam}$ , odbicia  $\Delta t_{odb}$  i lotu  $\Delta t_{lot}$ ,
- najniższego położenia środka masy  $y_{min}$  (dla czasu  $t_2$ ),
- położenia środka masy w chwili odbicia  $y_{odb}$  (dla czasu  $t_3$ ),
- najwyższego położenia środka masy  $y_{max}$ ,
- prędkości odbicia  $v_{odb}$  (dla czasu  $t_3$ ),
- energii (pracy odbicia) obliczonej na podstawie wzoru 7,
- maksymalnej mocy odbicia  $P_{max}$  (patrz rys.3),
- średniej mocy odbicia  $P_{sr}$  (wzór 8).

Wygląd arkusza na tym etapie obliczeń przedstawiono na rys.10.

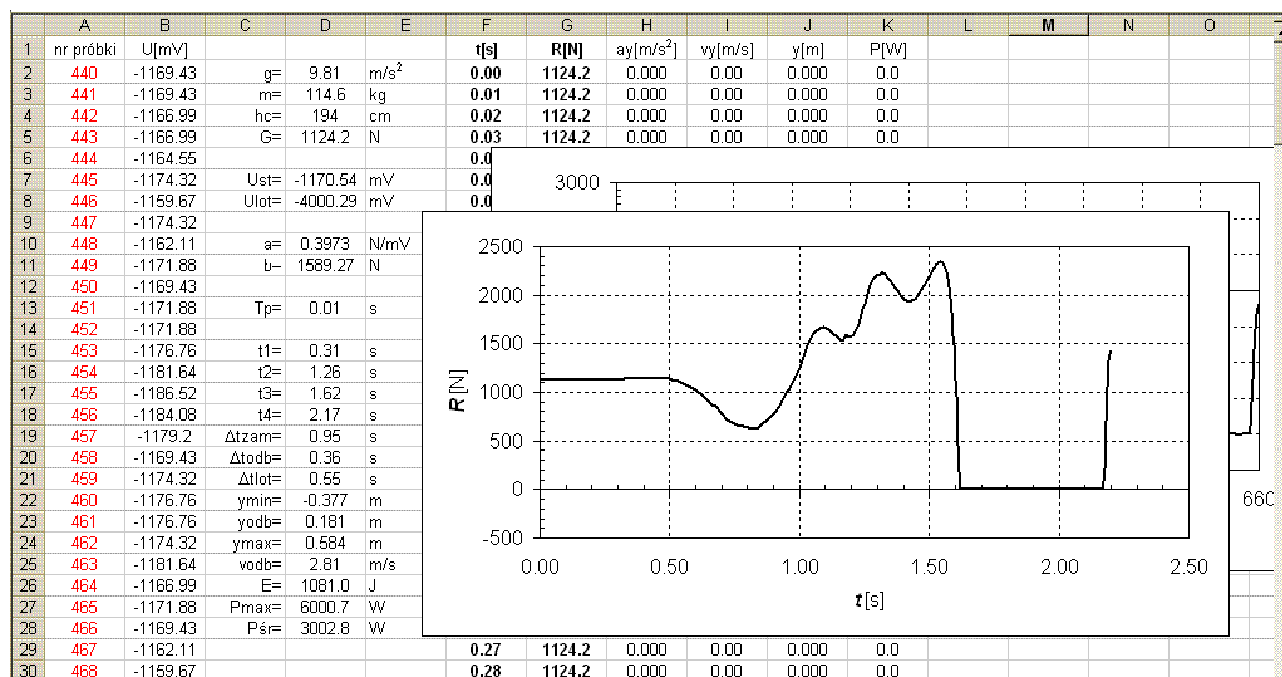
## 4. Prezentacja wyników obliczeń

Wyniki obliczeń przedstawiamy w oddzielnym arkuszu. Wykonujemy wykresy: reakcji podłoża  $R(t)$ , prędkości środka masy  $v_y(t)$ , położenia środka masy  $y(t)$  oraz mocy rozwijanej przez mięśnie  $P(t)$ . W celu uwidocznienia współzależności między nimi przedstawiamy je w jednym układzie współrzędnych (jak na rys.3). Aby przebiegi poszczególnych zmiennych były dostatecznie czytelne, musimy je wyrazić w takich jednostkach, przy których będą one miały porównywalne wartości, a zatem:  $R[kN]$ ,  $y[dc]$  oraz  $P[kW]$ . Ponadto w wierszu umieszczonym pod wykresem podajemy w kolejnych kolumnach wartości następujących wielkości:

- wieku badanego  $w[m-c]$
- masy ciała  $m[kg]$ ,
- ciężaru ciała  $G[N]$ ,
- wysokości ciała  $h_c[cm]$ ,

- czasu trwania fazy zamachu  $\Delta t_{zam}[s]$ ,
- czasu trwania fazy odbicia  $\Delta t_{odb}[s]$ ,
- czasu trwania fazy lotu  $\Delta t_{lot}[s]$ ,
- prędkości odbicia  $v_{odb}[m/s]$ ,
- minimalnego położenia środka masy  $y_{min}[m]$ ,
- położenia środka masy w chwili odbicia  $y_{odb}[m]$ ,
- maksymalnego położenia środka masy (wysokości wyskoku)  $y_{max}[m]$ ,
- maksymalnego przemieszczenia środka masy  $\Delta y = y_{max} - y_{min} [m]$ ,
- względnej wysokości wyskoku  $y_{max}/h_c[\%]$ ,
- pracy (energii odbicia)  $E[J]$ ,
- maksymalnej mocy odbicia  $P_{max}[W]$ ,
- średniej mocy odbicia  $P_{sr}[W]$ ,
- względnej energii odbicia  $E/m[J/kg]$ ,
- względnej mocy maksymalnej  $P_{max}/m[W/kg]$ ,
- względnej mocy średniej  $P_{sr}/m[W/kg]$

nie zapominając o nadaniu odpowiednich nagłówków. Formułujemy wnioski i uwagi.



Rys.10. Przykładowy wygląd arkusza kalkulacyjnego Excel po wykonaniu podstawowych obliczeń