

Magazyny (akumulatory) energii

zastosowania, kierunki rozwoju

Stanisław Piróg

AGH Kraków

pirog@agh.edu.pl

012 617 39 43



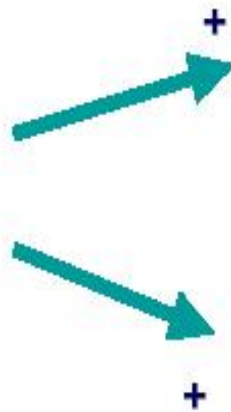
Energia i moc

$$P = dW/dt$$

40 l benzyny = 2000 MJ (2 GJ)



2 GJ = 555,5 kWh



=



2 GJ / 10 h
= 55,55 kW



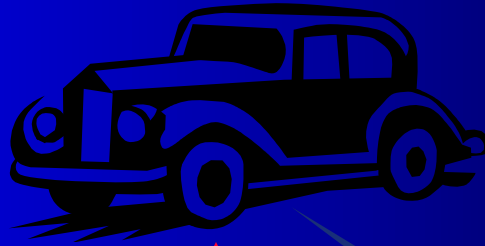
=



2 GJ / 10 s
= 200 MW



$$100[\text{W}] \cdot 10[\text{h}] = 1[\text{kWh}]$$



$m = 1000 \text{ kg}$

$h = 366 \text{ m}$



$$10^3[\text{kg}] \cdot 9,81[\text{m/s}] \cdot h = 10^3[\text{W}] \cdot 60^2[\text{s}]$$

$$h = 366 \text{ m}$$

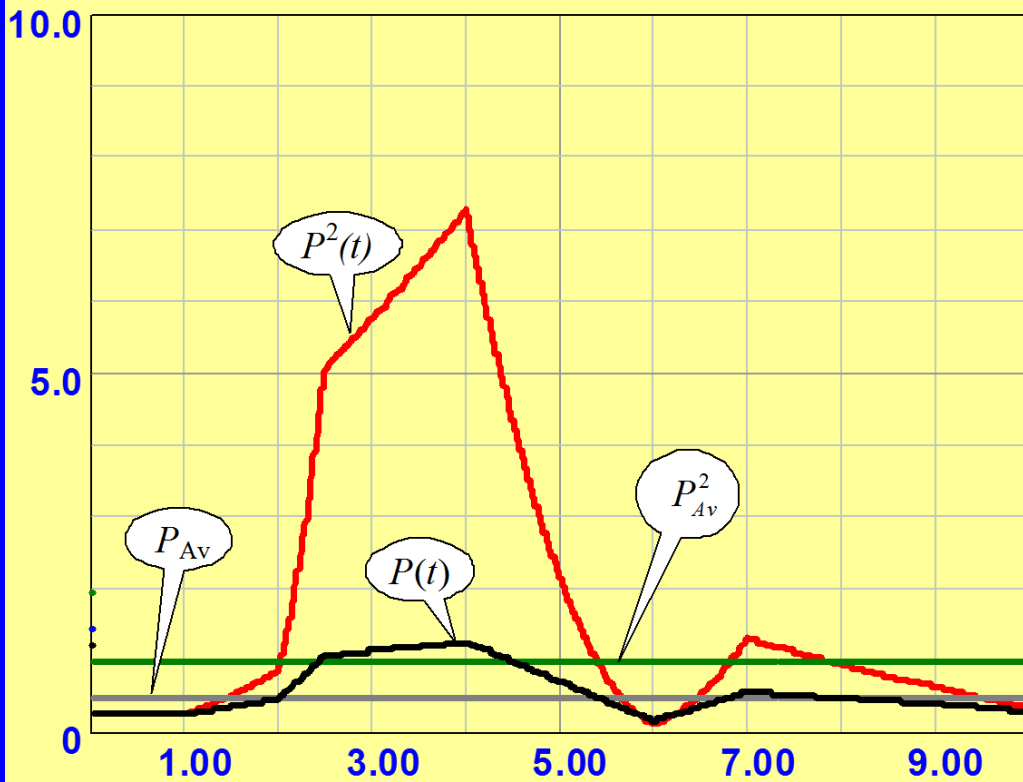
Kompensacja udarów mocy czynnej

Wskaźniki jakości energii:

$\cos\varphi$, THD, I_2/I_1 ,

$$P_{\max}/P_{av} \quad ?!$$

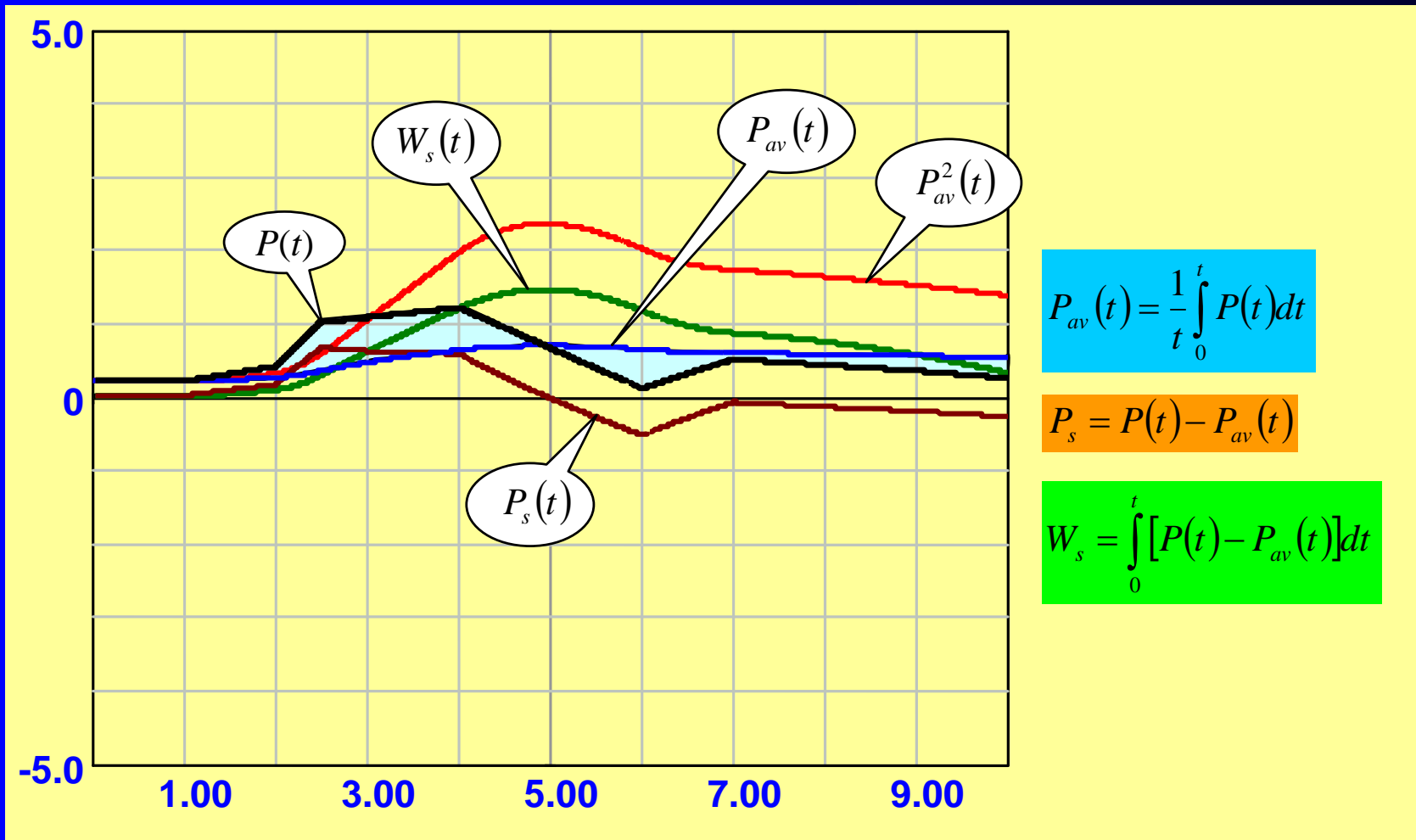
Cel: ograniczenie mocy zainstalowanej w systemie wytwarzania i przesyłu oraz zmniejszenie mocy w systemie elektroenergetycznym



$$\Delta P = 3R_s I^2 = 3R_s (I_P^2 + I_Q^2) = R_s \left(\frac{P^2 + Q^2}{U_p^2} \right) = \frac{R_s}{U_p^2} (P^2 + Q^2)$$

Przykładowe obciążenie wnoszone przez zakład w ciągu zmiany

Zasilanie z zastosowaniem magazynu energii



Przeznaczenie magazynów energii:

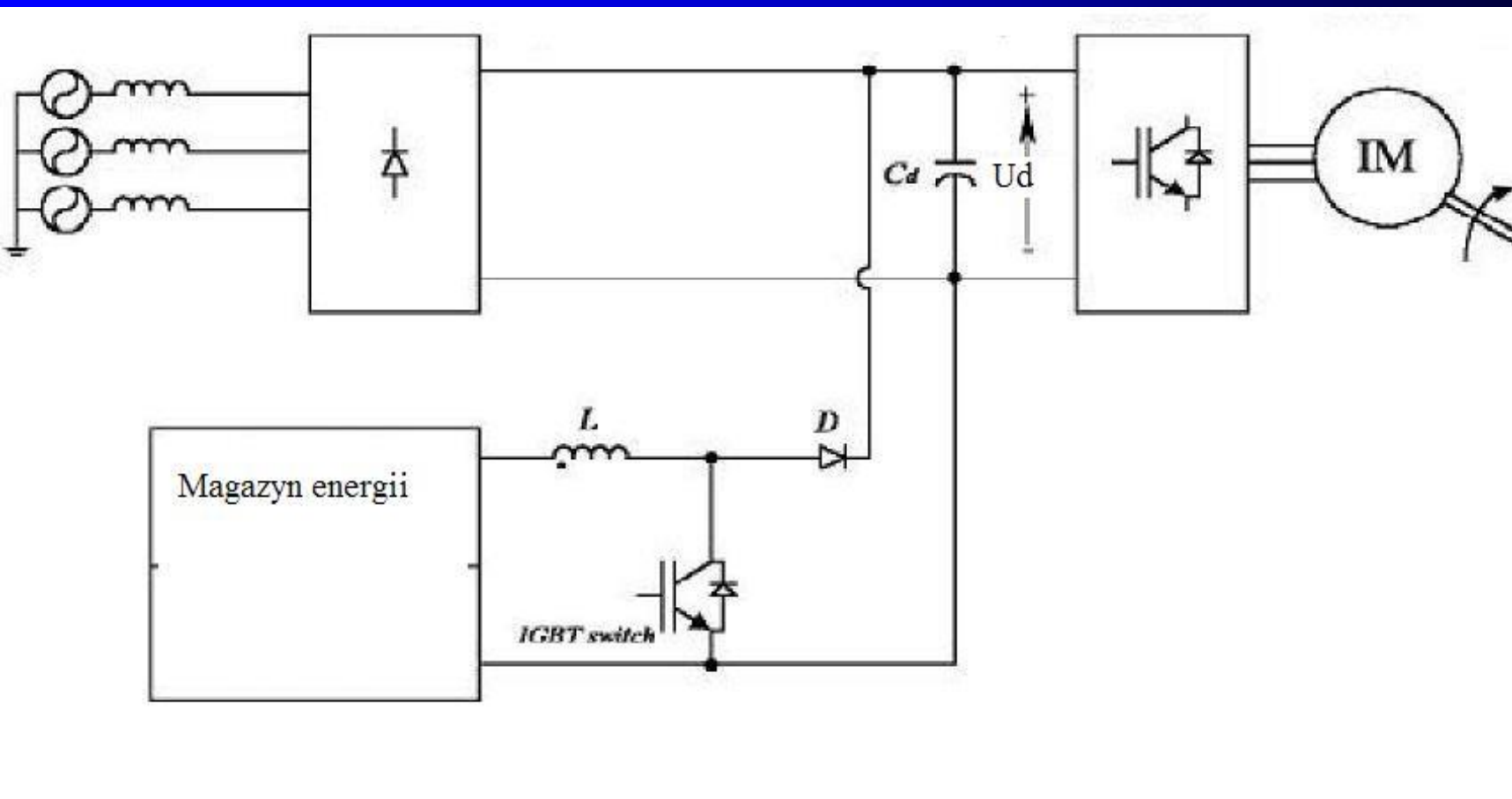
- akumulacja energii wytwarzanej przez alternatywne źródła energii elektrycznej (baterie słoneczne, elektrownie wiatrowe) nie współpracujące z systemem elektroenergetycznym ,
- do poprawy jakości energii elektrycznej w systemie elektroenergetycznym (stabilizacja napięcia, łagodzenie udarów mocy czynnej),
- podtrzymania, w czasie przerw w dostawie energii elektrycznej, pracy szczególnie ważnych urządzeń (układy UPS),

- w wykonaniu mobilnym do zasilania pojazdów zbiorowej komunikacji miejskiej oraz do zastosowania w samochodach hybrydowych,
- wytwarzanie krótkotrwałych impulsów o bardzo dużej mocy dla zasilania wyrzutni elektromagnetycznych (elektromagnetyczne działo szynowe) lub do generowania super silnych impulsów radiowych (radarowych),
- odzyskiwanie, dla ponownego wykorzystania, energii często hamujących urządzeń komunikacyjnych (windy w budynkach, elektryczne i hybrydowe pojazdy).

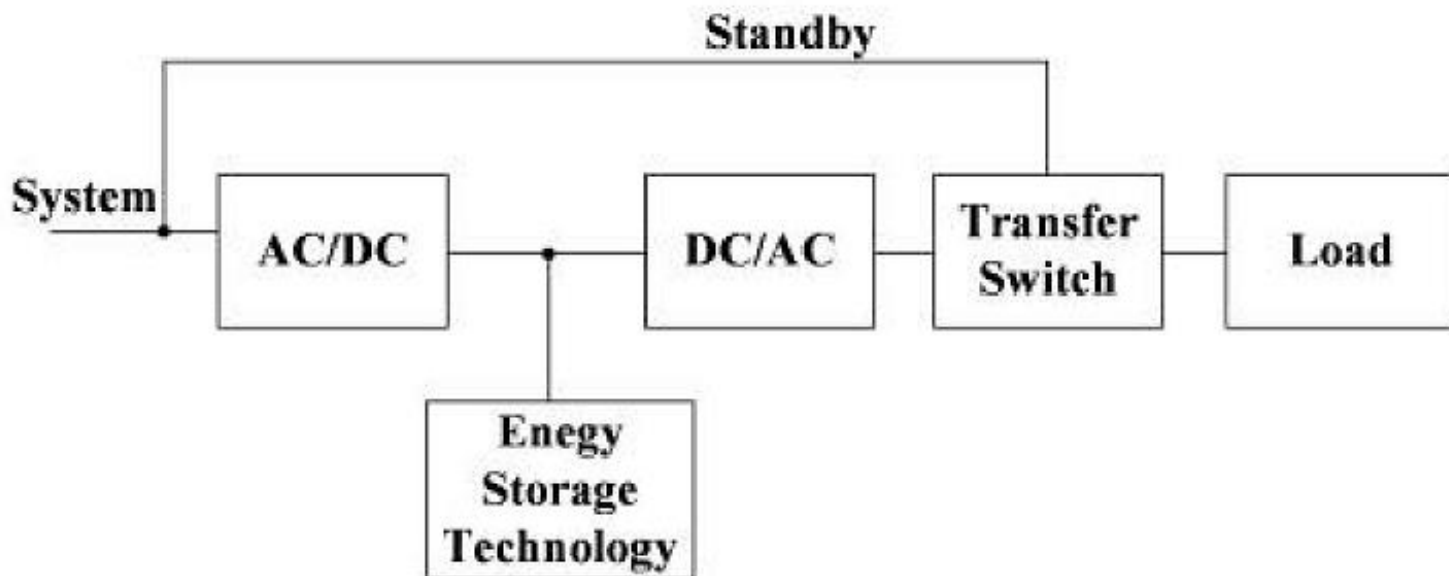
Przykładowe zastosowanie magazynów energii w przemyśle

1. Podtrzymanie zasilania przy krótkotrwałych zanikach i zapadach napięcia,
Wspieranie krótkotrwałych obciążeń linii zasilającej przekraczających jej możliwości przesyłowe,
Odzyskiwanie energii często hamujących napędów do jej ponownego wykorzystania w krótkim czasie (np. windy osobowe w biurowcach),
Układy poprawy jakości energii elektrycznej (układy ograniczające spadki i wahania napięcia).

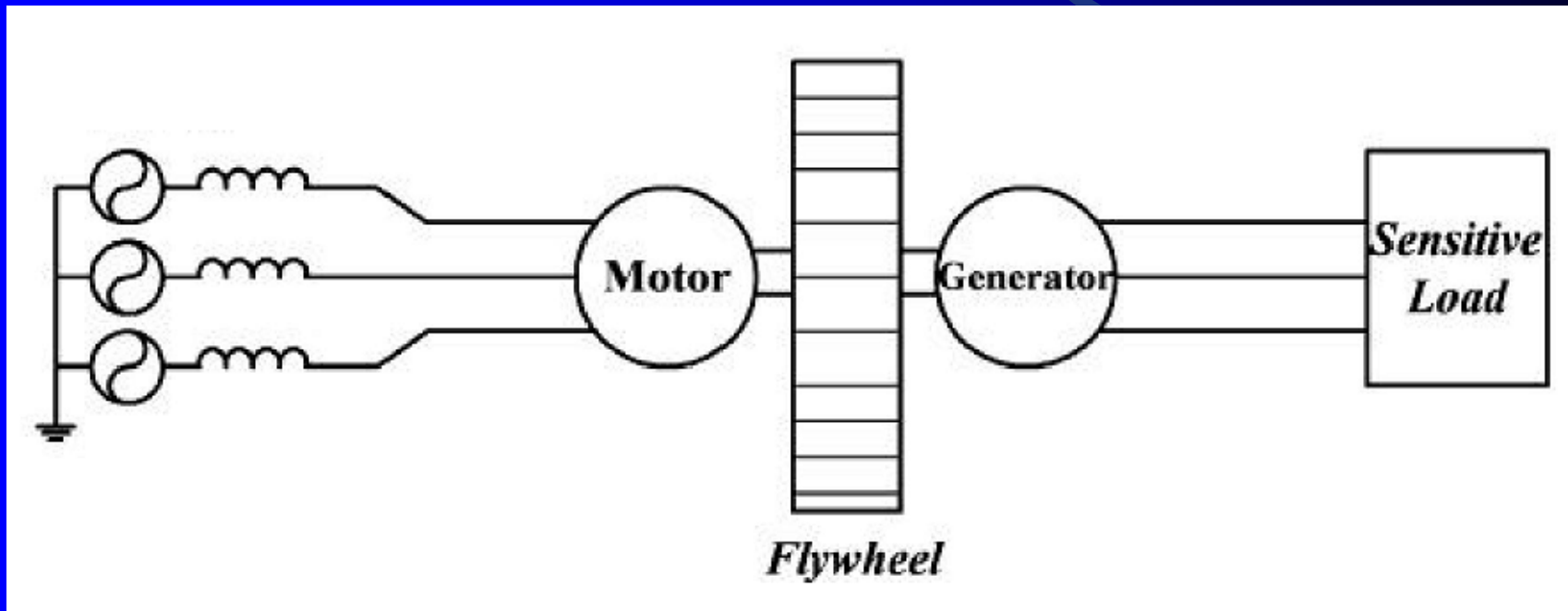
Układ bezprzerwowego zasilania ważnych napędów technologicznych
(np. produkcja szkła płaskiego)



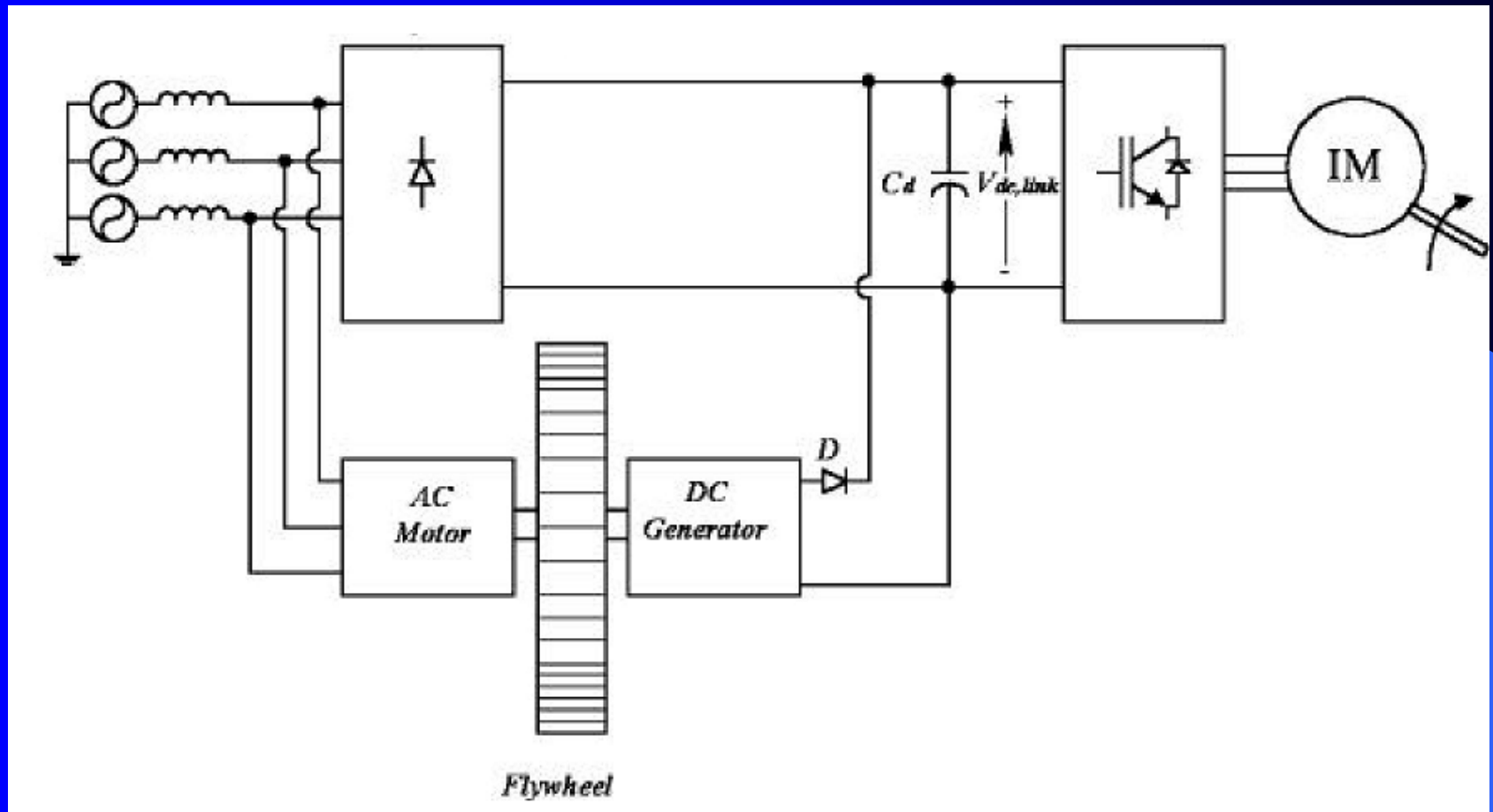
Typowa struktura UPS



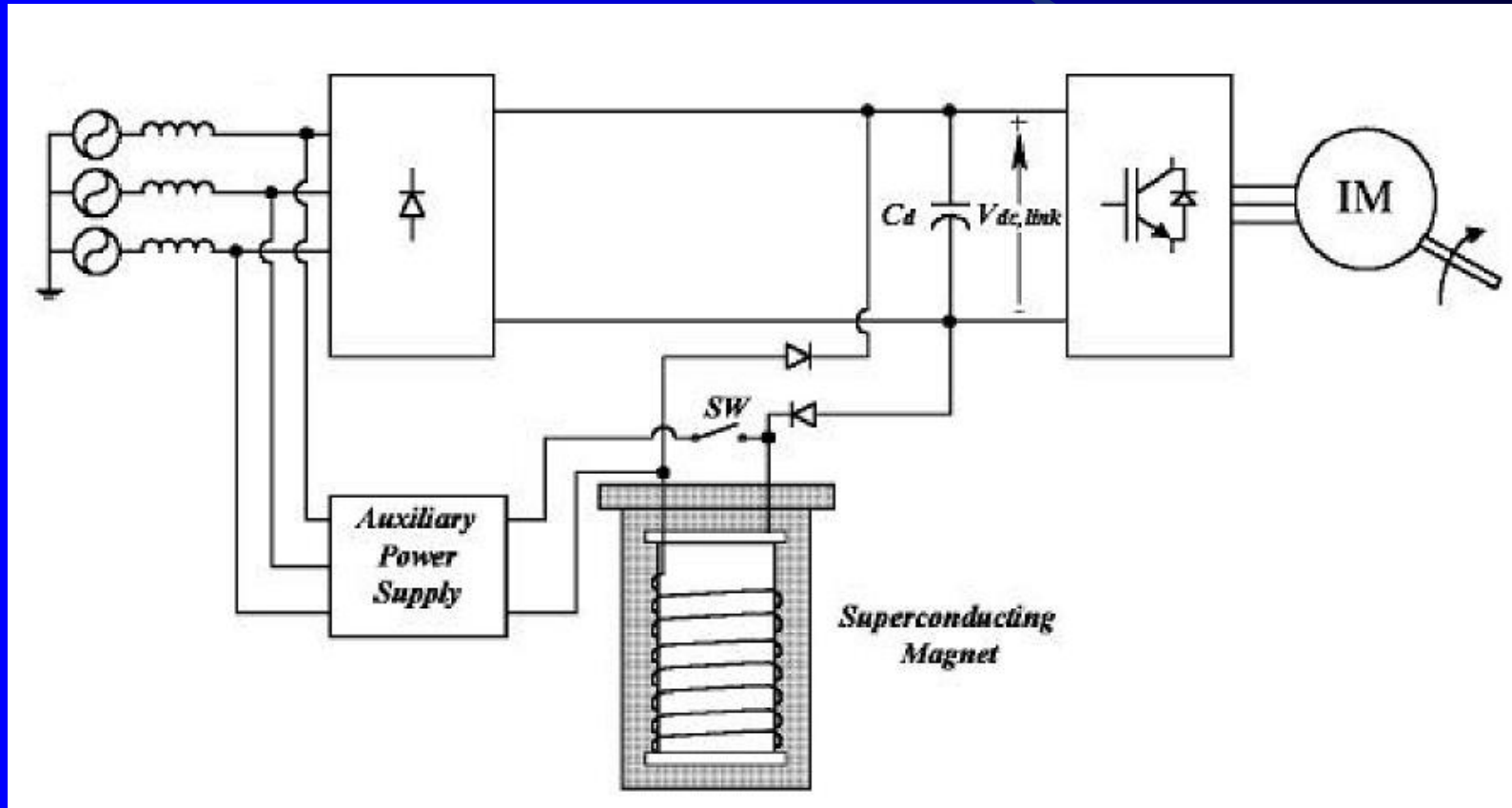
Systemy krótkotrwałego podtrzymania zasilania ważnych i wrażliwych odbiorników (np. do czasu startu generatorów awaryjnych)



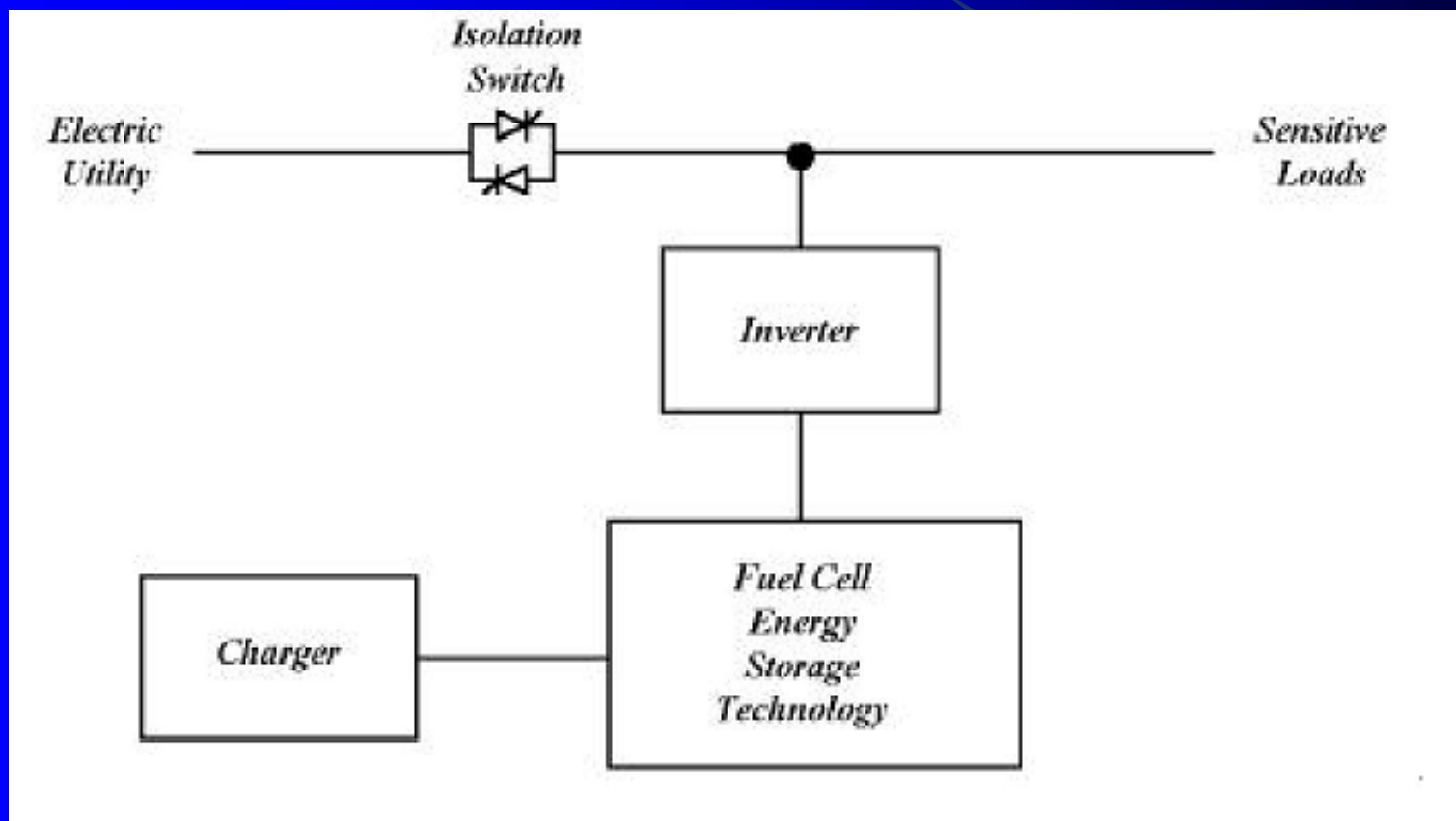
Systemy krótkotrwałego podtrzymania zasilania ważnych i wrażliwych odbiorników wykorzystujący zasobnik wirujący (np. do czasu zakończenia wrażliwego etapu procesu technologicznego)



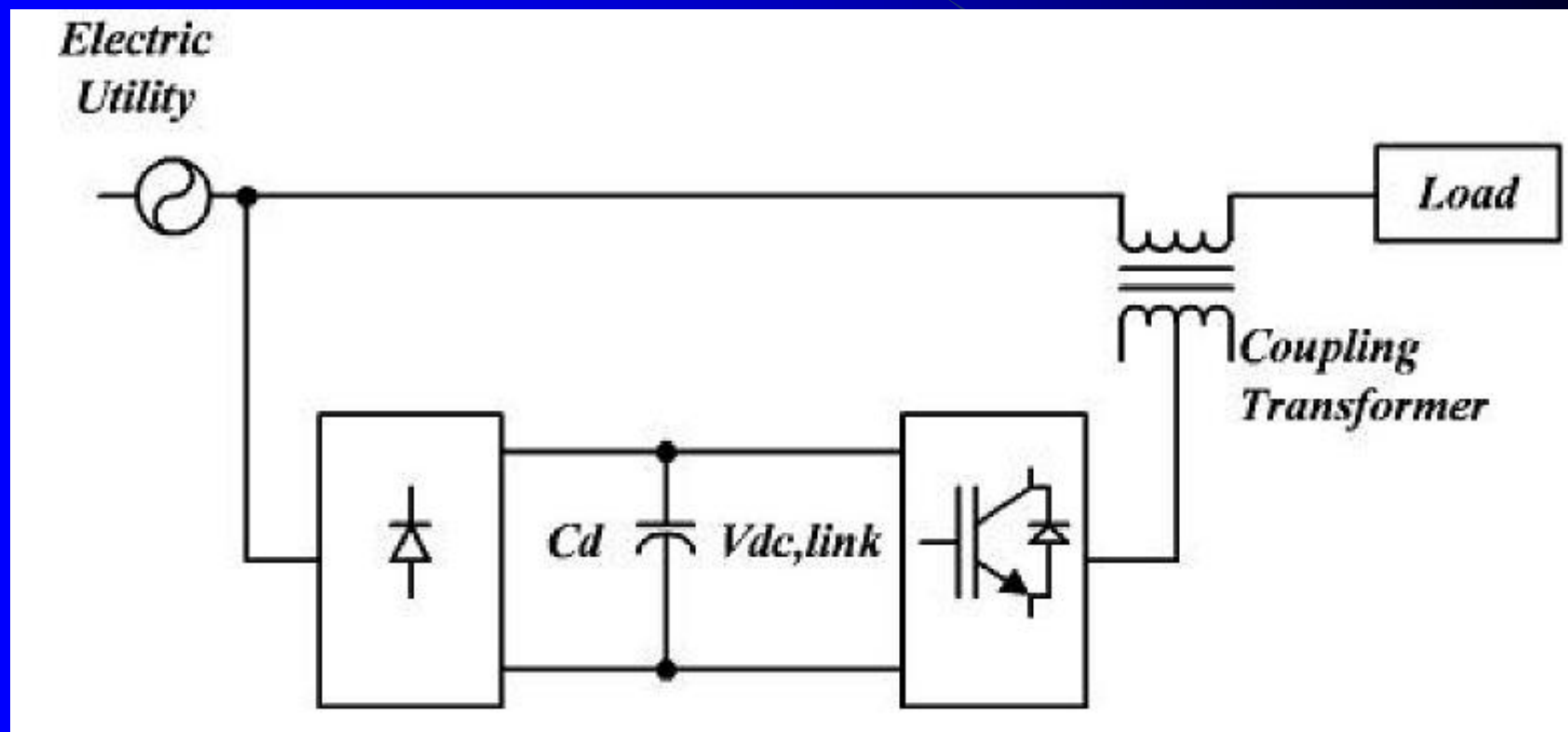
Systemy krótkotrwałego podtrzymania zasilania ważnych i wrażliwych odbiorników wykorzystujący zasobnik z cewką nadprzewodnikową SMES (np. do czasu zakończenia wrażliwego etapu procesu technologicznego)



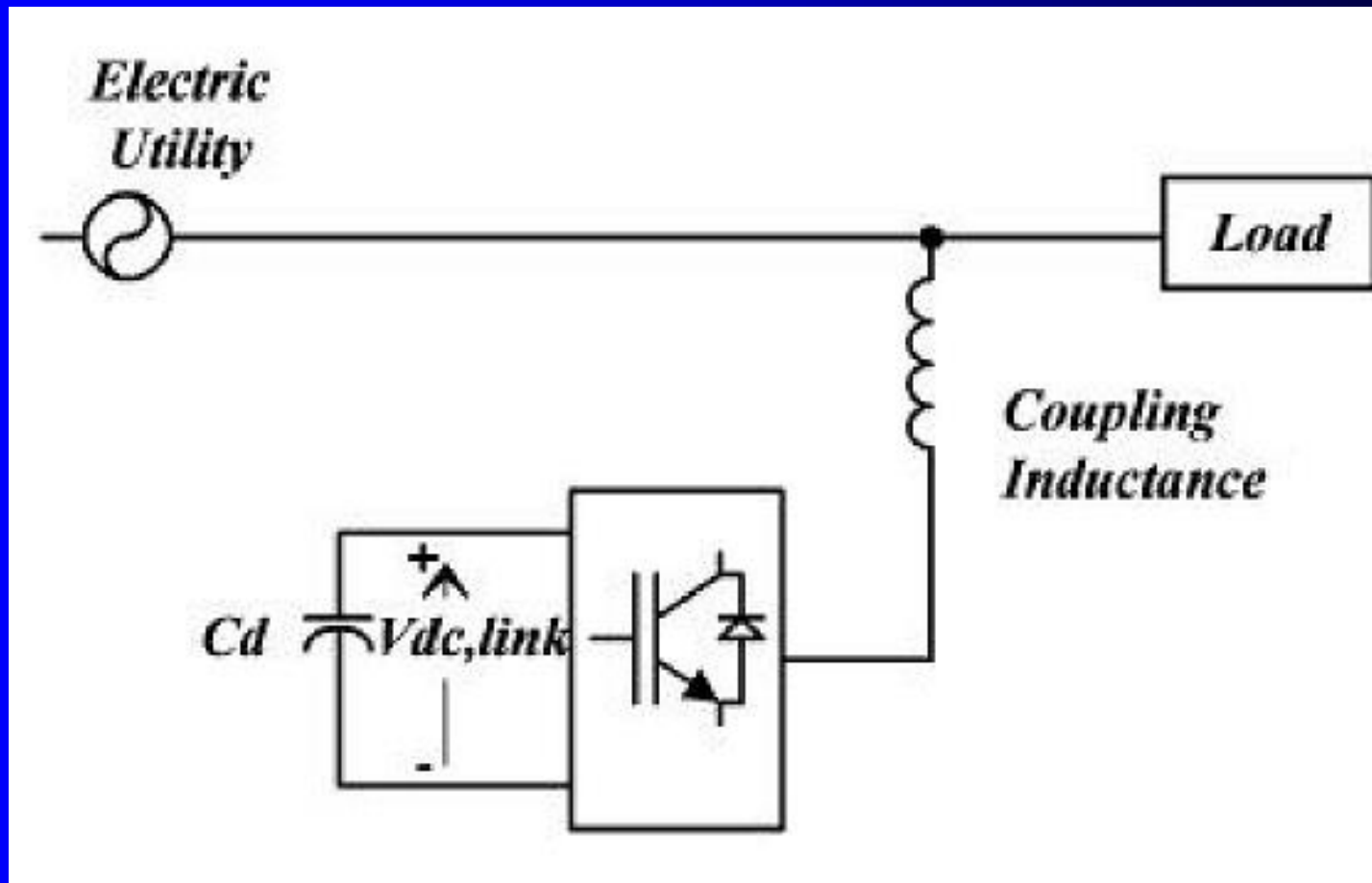
Ogniwo paliwowe jako zasobnik energii w systemie podtrzymania zasilania odbiorników wrażliwych



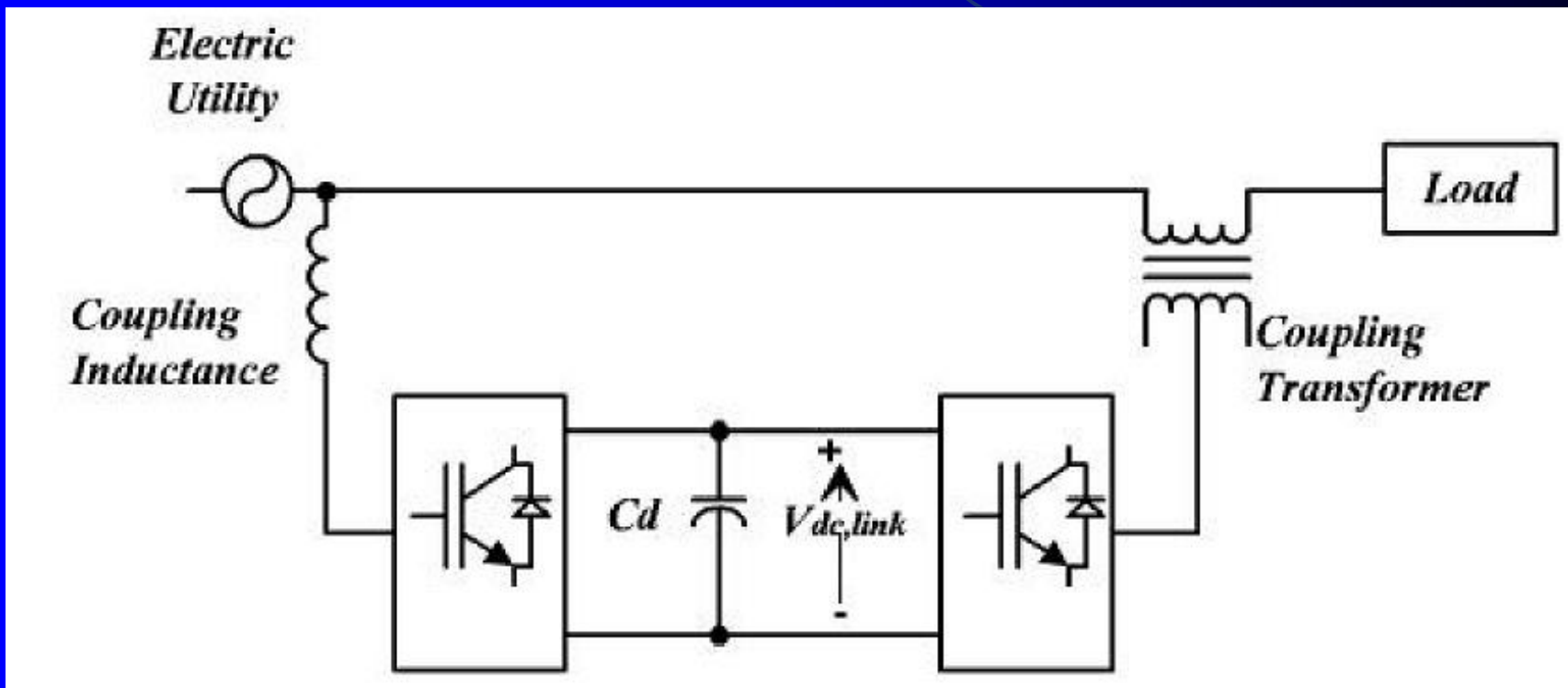
Szeregowy układ do poprawy jakości energii (stabilizacji napięcia) z zasobnikiem kondensatorowym



Równoległy układ do poprawy jakości energii (stabilizacji napięcia) z zasobnikiem kondensatorowym



Mieszany układ do poprawy jakości energii (stabilizacji napięcia) z zasobnikiem kondensatorowym



Wirujący zasobnik energii w trakcji kolejowej

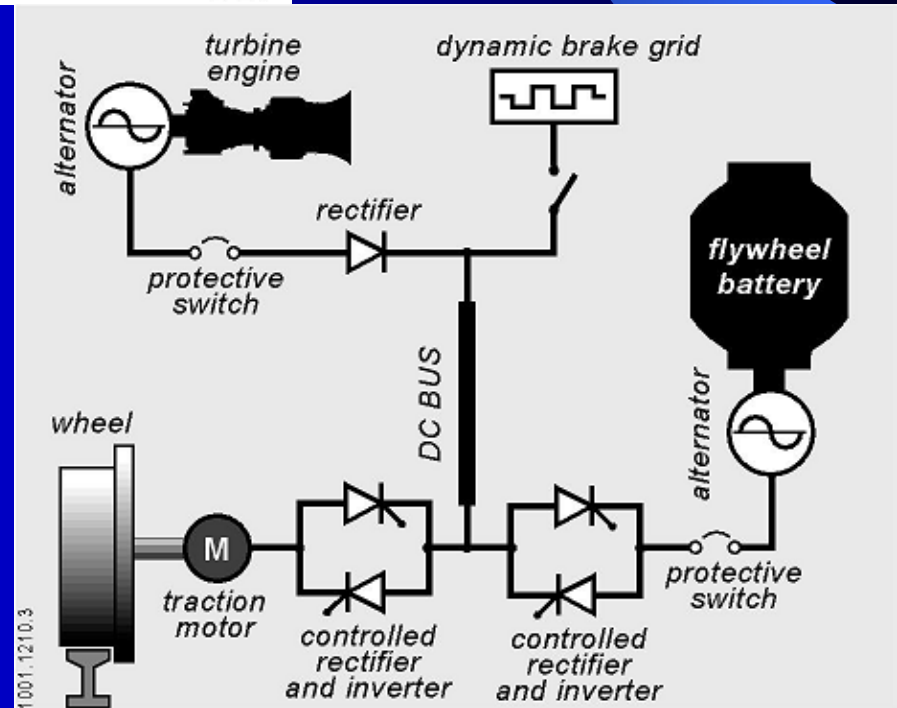
Design, Fabrication, and Testing of 10 MJ Composite Flywheel Energy Storage Rotors

J.D. Herbst, S.M. Manifold, B.T. Murphy, J.H. Price, R.C. Thompson, and W.A. Walls

Center for Electromechanics, The University of Texas at Austin

A. Alexander and K. Twigg

CAES



Zasobnik energii w systemach zgrzewania elektrycznego

Zasobnik energii w zasilaniu armaty szynowej (railgan)

Zasobnik energii w generacji wiatrowej dla eliminacji *efektu cienia wieży*

Źródła energii odnawialnej

Czysta energia odnawialna pochodzi z promieniowania słońca i może być pozyskiwana bieżąco w postaci:

- a) ciepła (solarne wymienniki ciepła pochłaniające energię bezpośrednio padającego światła lub nagrzewnice wytwarzające parę ogrzewane światłem skupionym przez zespoły śledzących za słońcem zwierciadeł,)
- b) energii elektrycznej (fotowoltaika).

Energia pozyskiwana w postaci ciepła może być magazynowana w różnych zasobnikach zawierających ciecz o dużym cieple właściwym dobrze termicznie izolowanych od otoczenia.

Nadmiarowa energia pozyskiwana z ogniw fotowoltaicznych (lub energia konieczna do dalszego przetworzenia w godzinach niesłonecznych) musi być magazynowana (akumulowana)

- c) Energia dostarczana w postaci ciepła na Ziemię w wyniku procesów termodynamicznych jest zamieniana na energię wiatru, pływów morskich energię potencjalną wód rzecznych. Energia ta może być (i jest) przetwarzana na energię elektryczną.

Ilość energia przetwarzanej przez elektrownie wodne może być (w krótkich przedziałach czasu) kontrolowana przez użytkownika.

Energia elektryczna pozyskiwana z wiatru może być pozyskiwana w czasie i ilości zależnej od aktualnej prędkości wiatru. Jest to źródło bardzo nieprzewidywalne.

d) Energia dostarczana w postaci ciepła na Ziemię w wyniku procesów biologicznych może być akumulowana w postaci węglowodorowych związków organicznych w organizmach żywych.

Energię tę można pozyskać poprzez spalanie biomasy lub biopaliw. Ten kierunek pozyskiwania energii odnawialnej nie wymaga stosowania systemów akumulacji. Energię tę można pozyskać poprzez spalanie biomasy lub biopaliw.

Metody gromadzenia energii

- Magazynowanie energii w postaci energii kinetycznej:
 - Pole magnetyczne (cewki nadprzewodnikowe),
 - Koła zamachowe,
 - Ciepło.
- Magazynowanie energii w postaci energii potencjalnej:
 - Superkondensatory (pole elektrostatyczne),
 - Akumulatory chemiczne i jonowe,
 - Wiązania chemiczne (paliwa, materiały wybuchowe),
 - Gospodarka wodorowa,
 - Sprężone powietrze,
 - Spiętrzona woda lub podniesiona na dużą wysokość woda,
 - Sprężyny mechaniczne.

1. Akumulatory chemiczne

(kwasowe lub zasadowe).

Zastosowanie akumulatorów chemicznych jest ograniczone ze względu na:

- a. niską sprawność ładowania i rozładowania,
- b. kłopotliwą obsługę (wydzielanie się gazów),
- c. krótką żywotność (skończoną liczbę cykli przeładowań),
- d. brak możliwości dokładnego określenia ilości energii znajdującej się w akumulatorze,
- e. zależność ilości możliwej do odzyskania energii od aktualnej temperatury akumulatora,
- f. brak możliwości wyłączenia z eksploatacji (dla poprawnej eksploatacji niewykorzystywanego akumulatora i zachowania jego funkcji konieczny jest przepływ minimalnego prądu - prąd konserwujący).

2. Magazyny elektromagnetyczne

Energia jest akumulowana w polu magnetycznym nadprzewodzącej cewki.

Zastosowanie elektromagnetycznych magazynów energii nie wychodzi poza fazę badań laboratoryjnych ze względu na:

- a. bardzo niską sprawność wynikającą z dużych energii niezbędnych na utrzymanie niskich temperatur (w ciekłym helu lub azocie),
- b. skomplikowany sposób ładowania i odzyskiwania energii,
- c. niebezpieczeństwo awarii niszczącej urządzenie w przypadku przekroczenia temperatury krytycznej.

3. Magazyny z superkondensatorami

Kondensatory o bardzo dużej jednostkowej pojemności (od kilku do kilkuset Faradów !!!!!!!), a co ważniejsze o dużym stosunku energii pola elektrycznego do objętości lub masy. Kondensatory te są wykonywane na bardzo niskie napięcie (1,1÷2,5V).

Korzystną cechą magazynów energii wykonanych z takich kondensatorów jest brak ruchomych części.

Wady:

- a. niskie napięcie robocze,
- b. trudności z realizacją bezpiecznej pracy szeregowej.

Engineering Characteristics

Charge/Discharge Time	Milliseconds to seconds
Operating Temperature	C -40 ° to +75 °
Operating Voltage Aqueous	1.1 V; Organic 2.5 V
Capacitance	100 mF to > 1000 F
Life	3,000 to 50,000 hrs
Power Density	0.01 to 10 kW/kg
Energy Density	0.05 to 10 Wh/kg
Pulse Load	0.1 to 100 A
Pollution Potential	Aqueous electrolyte is highly corrosive

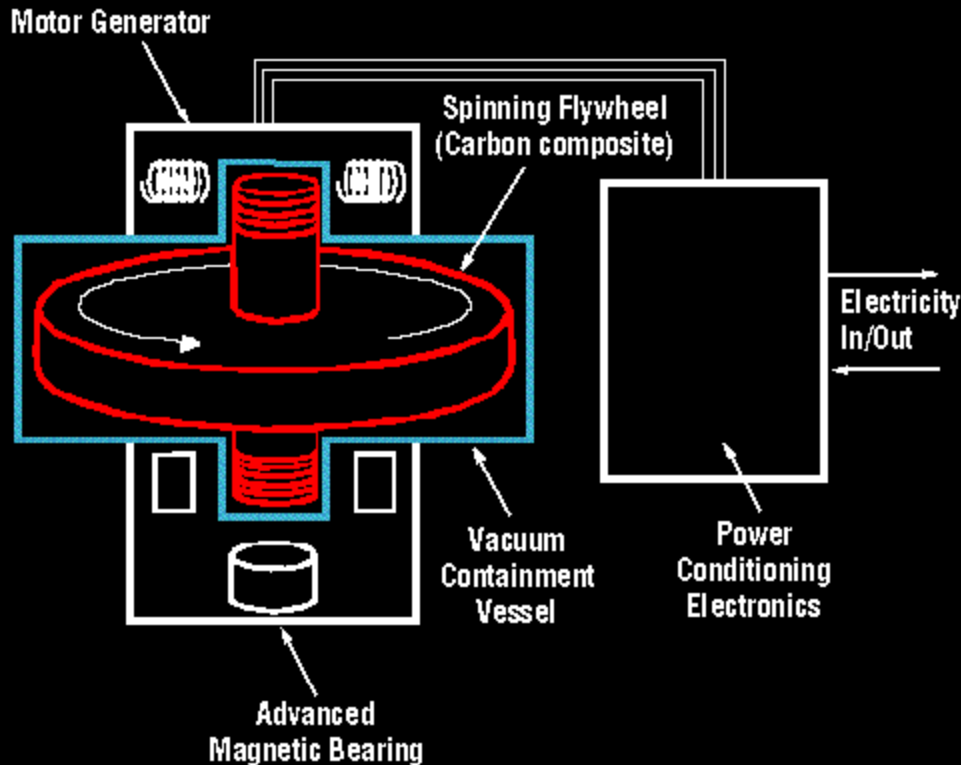
4. Magazyny elektromechaniczne

Akumulatory magazynujące energię w postaci energii kinetycznej wirującej masy i przetwarzające energię elektryczną na energię mechaniczną i mechaniczną na elektryczną.

Magazyny te mogą być wykonane jako wysokoobrotowe na łożyskach magnetycznych, próżniowe o bardzo dużym stosunku gromadzonej energii do masy i o wysokiej sprawności lub wolno obrotowe wirujące w powietrzu na łożyskach tocznych o mniejszej sprawności.

Magazyny wolnoobrotowe można budować na bazie tradycyjnych maszyn elektrycznych; np. dużej mocy pierścieniowa maszyna indukcyjna o 3 lub 6 parach biegunów z dwustronnym zasilaniem `wyposażona w duży bezwładnik. Magazyny takie mają niską sprawność (straty aerodynamiczne i łożyskowe oraz straty energii w maszynie elektrycznej), ale można je budować na wielkie energie (MJ) i moce szczytowe (MW).

FLYWHEEL STORES ENERGY



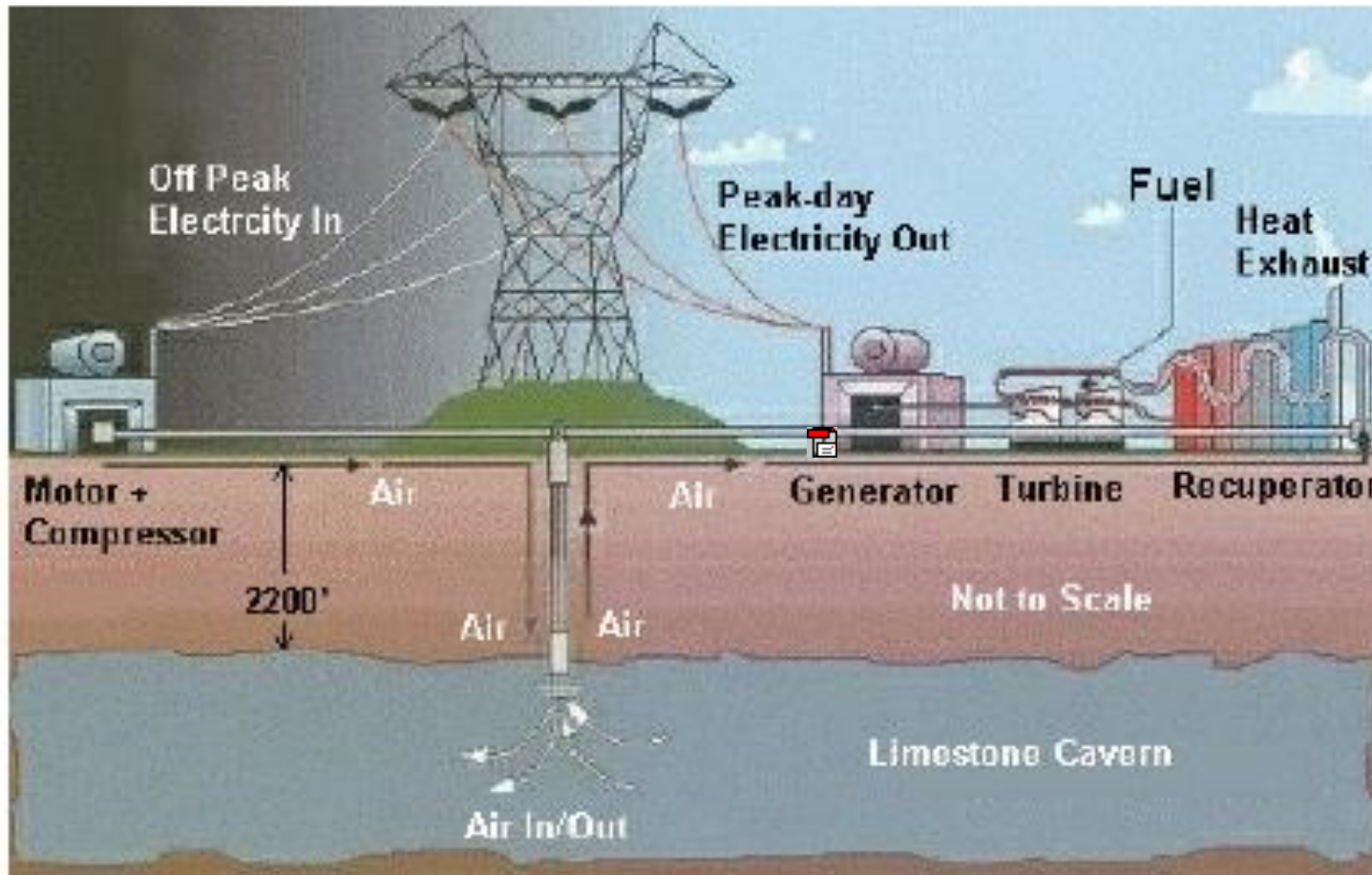
ADVANTAGES

- **High power output**
- Long life
- Unaffected by ambient temperature extremes

CHALLENGES

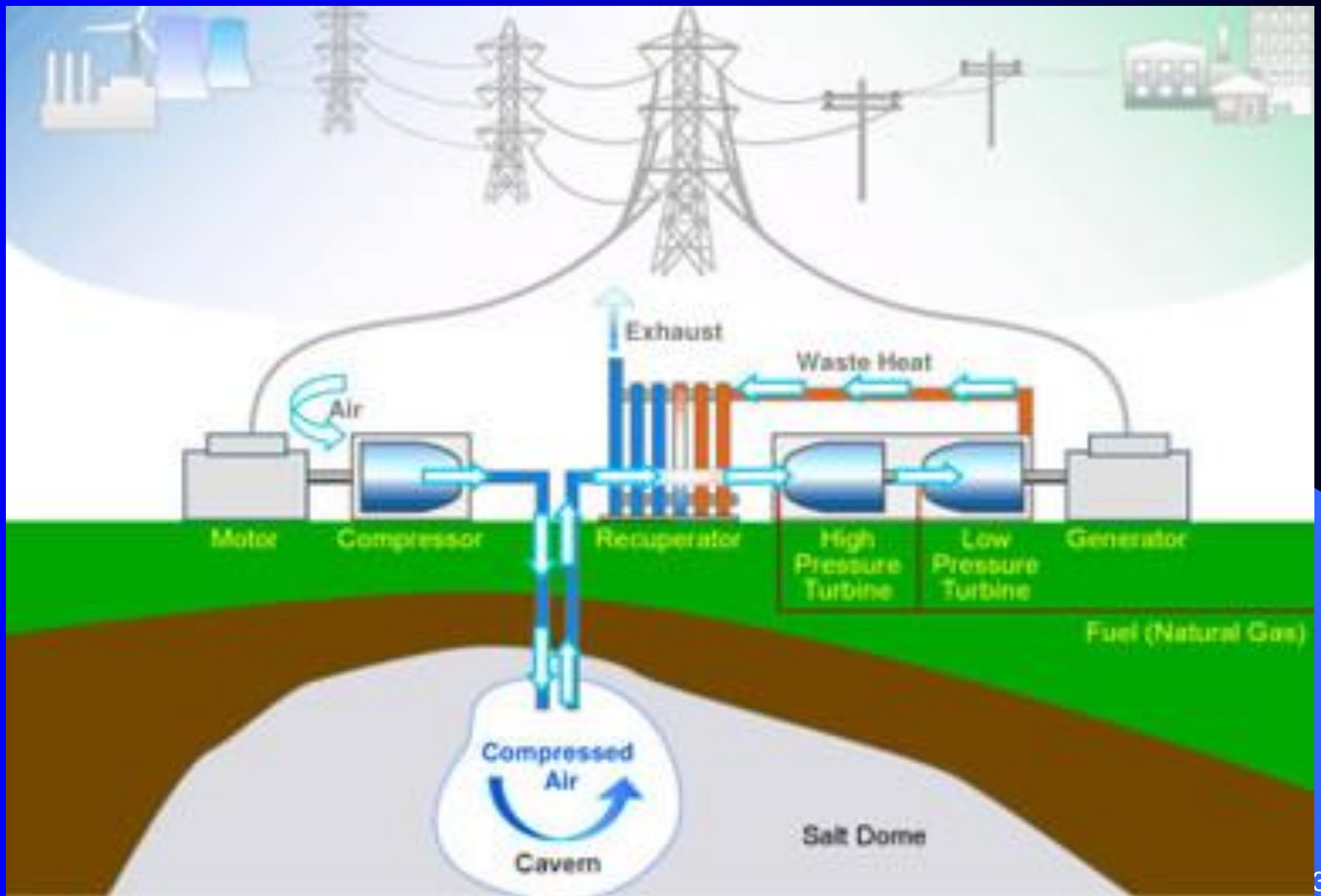
- Reduce cost of flywheel rotor and advanced magnetic bearing
- Mass produce with quality
- Develop lightweight vacuum containment vessel
- Reduce overall system weight

5. Magazyny ciśnieniowe (sprężone powietrze)



Proposed 2700
MW plant
in Norton, Ohio

Photo from CAES Development Company



6. Magazyny wodne



26. 07. 2001



26. 07. 2001

Przy spiętrzeniu na wysokość ok. 50 m 1 kg (1 litr) wody ma energię potencjalną $W=mgh=500\text{J}$.

Zakładając 80% sprawność przetwarzania energii potencjalnej na kinetyczną (spadającej na łopaty turbiny wody) i dalej na elektryczną, każdy litr wody w ciągu sekundy wytwarza moc $P=0,8 \cdot 500\text{J/s}=400\text{W}$.

W ciągu miesiąca 1 litr wody wytwarza energię elektryczną:

$$W=400[\text{W}] \cdot 24[\text{h}] \cdot 30=288\text{kWh}$$

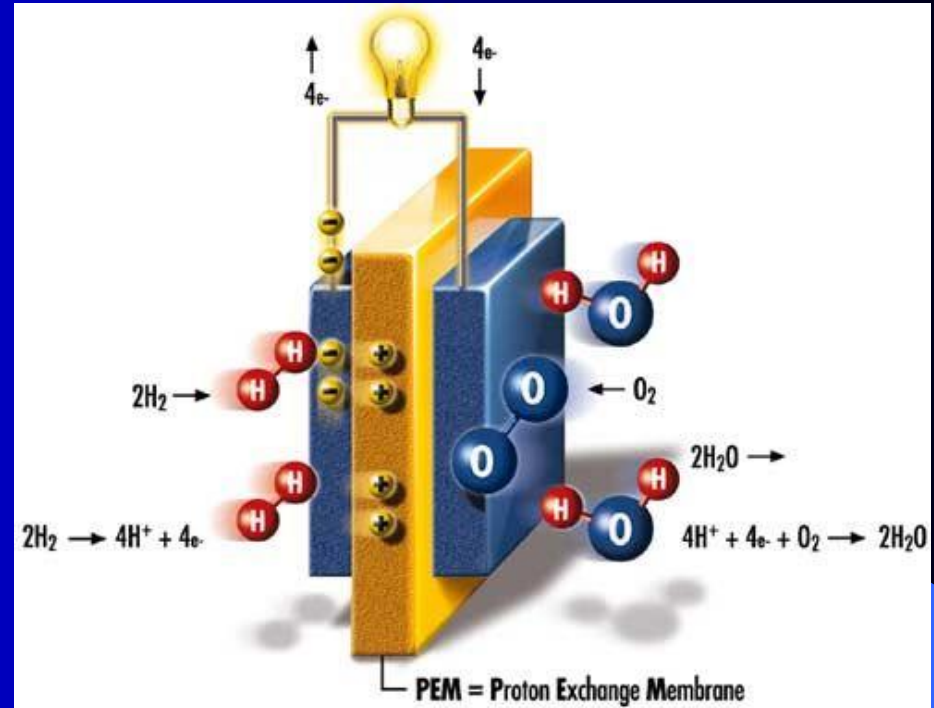
Polskie elektrownie szczytowo-pompowe

- **Elektrownia Żarnowiec** - 716 MW (największa w Polsce)
- **Elektrownia Porąbka Żar** - 500 MW
- **Zespół Elektrowni Wodnych Solina-Myczkowce** - moc 200 MW po modernizacji 2000-2003, przed modernizacją 136 MW
- **Elektrownia Żydowo** - 156 MW (pierwsza w Polsce)
- **Elektrownia Czorsztyn-Niedzica_Sromowce** - 94,6 MW
- **Elektrownia Dychów** - 90 MW (do września 2005 - 79,3 MW)



Elektrownia Szczytowo-Pompowa w Żarnowcu - rury, którymi spływa woda ze zbiornika Czymanowo (sztuczne jezioro powierzchni 122 ha i pojemności 13 milionów metrów sześciennych)

7. Wytwarzanie wodoru i ogniwa paliwowe



Sprawność uzyskiwania wodoru metodą elektrolizy z czystej wody - 67%

Wodór jako paliwo wtórne powinien być przechowywany w stanie ciekłym w temperaturze (20 K; -253 C).

W stanie ciekłym gęstość energii jest ok. 1000 razy większa niż w stanie gazowym, ale utrzymanie niskiej temperatury pochłania znaczną energię.



Graf Zeppelin Gliwice 1931 r.



Oberschlesienfahrt des Luftschiffes „Graf Zeppelin“ 1931
Zepp über dem Flughafen Gliwicz

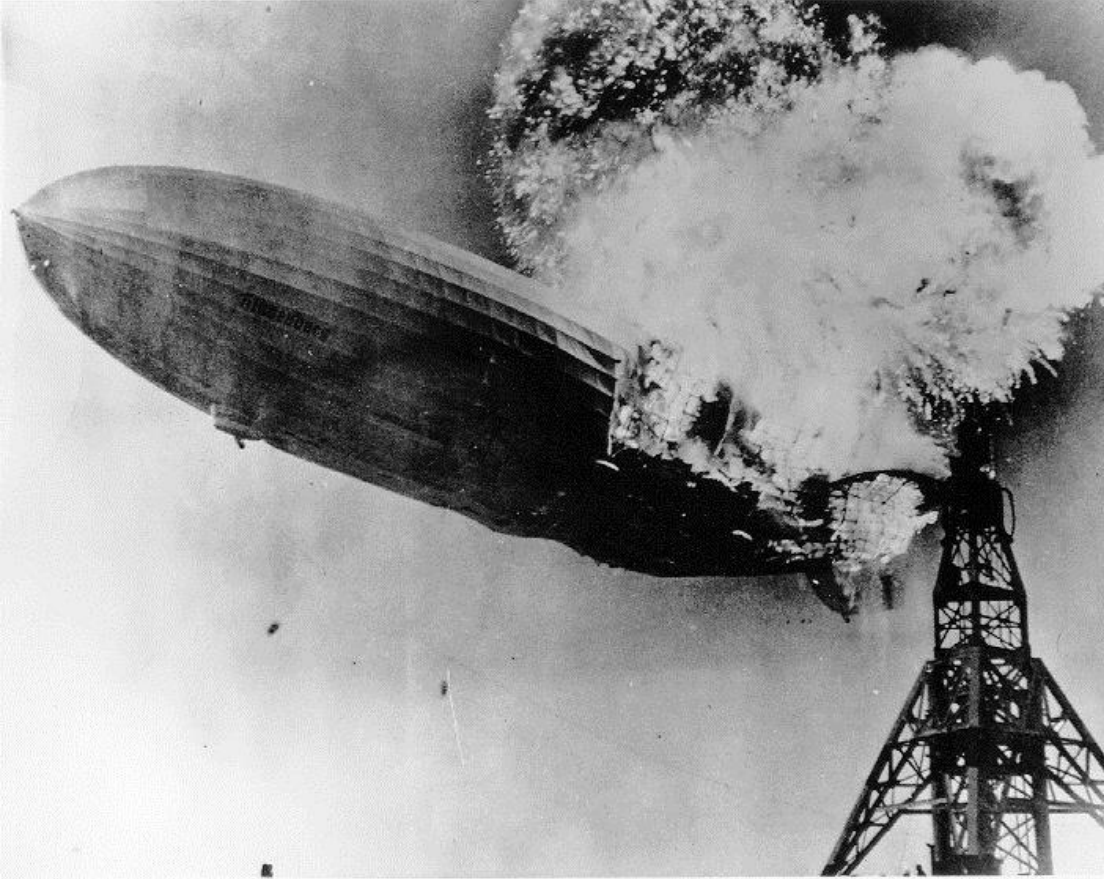
Wodór – zagrożenia:

1. Łatwopalny, niewidoczny płomień,
2. Spalanie z powietrzem jest źródłem toksycznych wielotlenków azotu (NO_x)

Wodór – zalety:

1. Duża gęstość energii,
2. Łatwy do otrzymywania (elektroliza, termoliza),
3. Bezpiecznie spalany z powietrzem (bez emisji NO_x) w niskotemperaturowych ogniwach paliwowych,
4. Brak emisji CO_2 .

Zeppelin LZ 129 Hindenburg
May 6, 1937
Lakehurst Naval Air Station
New Jersey



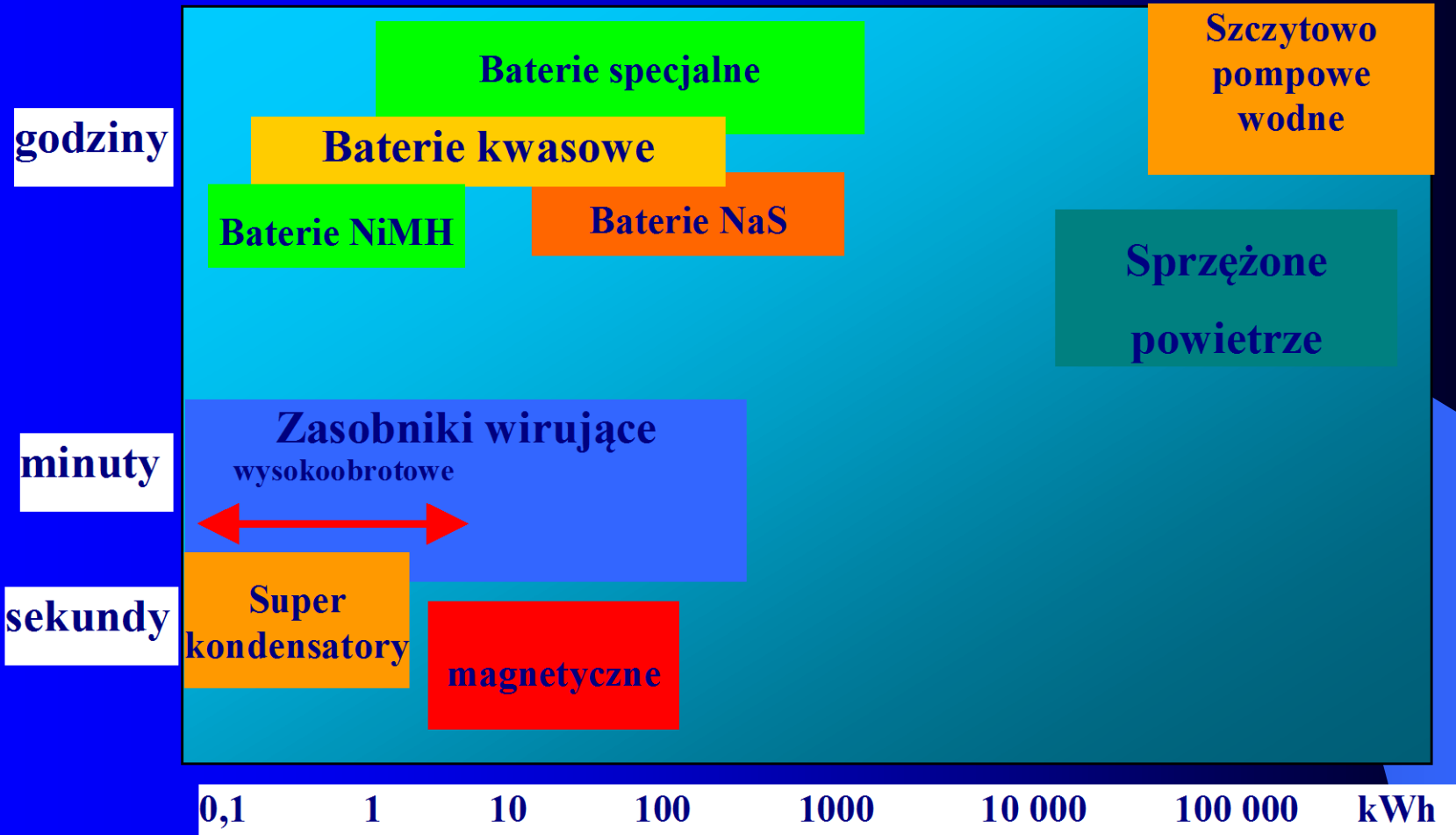
Porównanie magazynów energii

Magazyny energii można podzielić na przeznaczone do:

- a. długotrwałego przechowywania i oddawania energii (w ciągu kilku do kilkunastu godzin) przy stosunkowo małej mocy. W tym przypadku straty związane z magazynowaniem energii powinny być bardzo małe.
- b. Krótkotrwałego przechowywania energii i jej oddawania w krótkim czasie. Od urządzeń takich wymaga się zdolności do pracy z dużą mocą i przy rozładowaniu i ładowaniu.

Porównanie magazynów energii

Czas rozładowania



Electrical Power & Energy Storage Comparison



Maksymalna gęstość energii w zasobniku

Jako kryterium dla porównania możliwej do osiągnięcia gęstości energii (ilości energii na jednostkę objętości lub masy elementu magazynującego) przyjęto wartość energii przy której występuje przekroczenie wytrzymałości materiału zasobnika.

Dla kondensatora jest to wartość napięcia dla której następuje przebicie dielektryka, dla cewki powietrznej wartość prądu powodującego jej rozerwanie pod wpływem siły elektrodynamicznej, a dla koła zamachowego prędkość przy której następuje jego rozerwanie pod wpływem sil odśrodkowych.

Gromadzenie energii w kondensatorze

$$W = \frac{CU^2}{2}$$

$$C = \frac{\epsilon S}{l}$$

$$U_{\max} = K_U l$$

Maksymalna wartość energii w polu elektrostatycznym kondensatora:

$$W_{\max} = \frac{CU_{\max}^2}{2} = \frac{\epsilon S}{2l} (K_U l)^2 = \frac{\epsilon K_U^2}{2} S l = \frac{\epsilon K_U^2}{2} V$$

Maksymalna gęstość energii w polu elektrostatycznym kondensatora:

$$\frac{W_{\max}}{V} = \frac{\epsilon K_U^2}{2}$$

$$\frac{W_{\max}}{m} = \frac{W_{\max}}{\rho V} = \frac{\epsilon K_U^2}{2\rho}$$

Przyjmując dla polipropylenu:

$$K_U = 40 \text{ kV/mm}, \quad \varepsilon = 2,6\varepsilon_0 = 2,6 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}, \quad \rho = 900 \text{ kg/m}^3$$

otrzymuje się:

$$\frac{W_{\max}}{V} = \frac{2,6 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} (4 \cdot 10^7)^2}{2} = 18,4 \text{ kJ/m}^3$$

albo:

$$\frac{W_{\max}}{m} = \frac{2,6 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} (3 \cdot 10^7)^2}{2 \cdot 900} = 20,4 \text{ J/kg}$$

Gromadzenie energii w polu magnetycznym cewki

$$W = \frac{LI^2}{2}$$

Indukcyjność cylindrycznej cewki o promieniu r , długości $l \gg 2r$, grubości uzwojenia $\Delta r \ll 2r$ i liczbie zwojów w :

$$L = \frac{\mu S w^2}{l} = \frac{\pi r^2 \mu w^2}{l}$$

Energia gromadzona w polu magnetycznym takiej cewki:

$$W = \frac{LI^2}{2} = \frac{\mu S}{2l} w^2 I^2 = \frac{\mu \pi r^2}{2l} w^2 I^2$$

Uwzględniając, że indukcja magnetyczna ma wartość:

$$B = \mu H = \frac{\mu I w}{l}$$

Energia pola magnetycznego cewki może być zapisana następująco:

$$W = \frac{\mu S}{2l} w^2 I^2 = \frac{B^2 S l}{2\mu} = \frac{B^2 V}{2\mu}$$

Na całym obwodzie pojedynczego zwoju działa siła rozrywająca:

$$F = BI \cdot 2\pi r = \frac{B^2 l}{w\mu} \cdot 2\pi r$$

Na elementarny odcinek zwoju działa siła radialna:

$$dF_r = \frac{F}{2\pi r} r d\varphi = \frac{B^2 l}{w\mu} r d\varphi$$

Jej składowa w kierunku osi x ma wartość:

$$dF_x = \frac{B^2 l}{w\mu} r \cos \varphi d\varphi$$

$$F_x = w \cdot \frac{B^2 l}{w\mu} r \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos \varphi d\varphi = \frac{B^2 l}{\mu} r$$

Na prężenie rozrywające cewkę ma wartość:

$$\sigma = \frac{F_x}{2l \cdot \Delta r} = \frac{B^2}{2\mu} \frac{r}{\Delta r}$$

Stąd graniczna wartość indukcji pola magnetycznego:

$$B_{\max} = \sqrt{2\sigma\mu \frac{\Delta r}{r}}$$

σ – graniczna wartość naprężenia rozrywającego cewkę

Maksymalna wartość energii możliwej do zgromadzenia w polu magnetycznym cewki o objętości $V = Sl = \pi r^2 l$ i objętości uzwojenia $V_w = 2\pi r l \Delta r$

$$W_{\max} = \frac{B_{\max}^2 V}{2\mu} = \sigma \frac{\Delta r}{r} V = \sigma \Delta r \pi r l = \frac{1}{2} \sigma V_w$$

Stąd graniczna gęstość energii:

$$\frac{W_{\max}}{V} \approx \sigma \frac{\Delta r}{r}$$

$$\frac{W_{\max}}{m} = \frac{\sigma}{2\rho}$$

Dla powietrznej ($\mu=4\pi 10^{-7}$ H/m) cewki miedzianej $\rho = 9 \cdot 10^3$ kg/m³, $\sigma_{\max} = 5 \cdot 10^7$ N/m²
 $\Delta r = 0,2r$ otrzymuje się graniczną wartość gęstości energii:

$$\frac{W_{\max}}{m} = \frac{\sigma \mu}{2\rho} = \frac{5 \cdot 10^7}{2 \cdot 9 \cdot 10^3} = 2,78 \text{ kJ/kg}$$

albo:

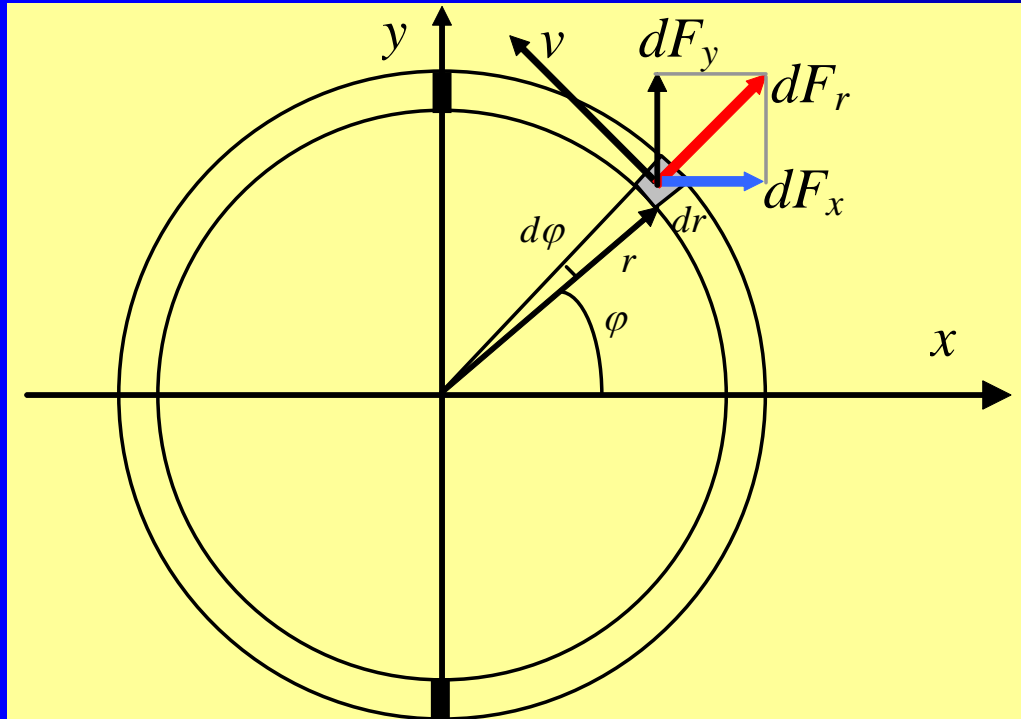
$$\frac{W_{\max}}{V} \approx \sigma \frac{\Delta r}{r} = 5 \cdot 10^7 \cdot 0,2 = 10 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3 = 10 \text{ MJ/m}^3$$

Stąd maksymalna wartość indukcji magnetycznej w cewce miedzianej:

$$B_{\max} = \sqrt{2\sigma\mu \frac{\Delta r}{r}} = \sqrt{2 \cdot 5 \cdot 10^7 \cdot 4\pi 10^{-7} \cdot 0,2} = 2,83 \text{ Vs/m}^3$$

Gromadzenie energii w postaci energii kinetycznej

koła zamachowego



Elementarna masa:

$$dm = \rho \cdot h \cdot r d\varphi \cdot dr$$

ρ – gęstość materiału koła zamachowego,
 r, h – jego promień zewnętrzny i wysokość

Elementarna siła radialna:

$$F_r = dm \cdot \frac{v^2}{r} = \rho \cdot h \cdot d\varphi \cdot dr \cdot v^2$$

Składowa siły rozrywającej w kierunku osi x :

$$F_x = 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} dF_x \cos \varphi \cdot d\varphi = 2\rho \cdot h \cdot dr \cdot v^2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos \varphi \cdot d\varphi = 2\rho \cdot h \cdot dr \cdot v^2$$

Naprężenie rozrywające σ_r na powierzchni wirującego walca:

$$\sigma_r = \frac{F_x}{2 \cdot h \cdot dr} = \frac{2\rho \cdot h \cdot dr \cdot v^2}{2 \cdot h \cdot dr} = \rho \cdot v^2$$

Związek pomiędzy prędkością obwodową v i naprężeniem rozrywającym σ na powierzchni wirującego walca wykonanego z materiału o gęstości ρ :

$$v = \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}}$$

Maksymalna wartość energii kinetycznej gromadzona w bryle o momencie bezwładności J wirującej z prędkością kątową ω_{max} :

$$W_{k \max} = \frac{1}{2} J \omega_{\max}^2 \quad (1)$$

Moment bezwładności J wydrążonego walca o promieniu zewnętrznym r_z i wewnętrznym r_w ma wartość:

(2)

$$J = \frac{1}{2} \pi h \rho (r_z^4 - r_w^4)$$

Maksymalna prędkość obwodowa walca wykonanego z materiału o dopuszczalnym naprężeniu na rozrywanie R_e wykonanego z materiału o masie właściwej ρ jest równa:

$$v_{\max}^2 = \frac{R_e}{\rho}$$

(3)

Maksymalna prędkość obrotowa koła zamachowego zależna jest od dopuszczalnej prędkości na jego powierzchni:

$$\omega_{\max}^2 = \frac{v_{\max}^2}{r_z^2} = \frac{R_e}{r_z^2 \rho} \quad (4)$$

Po podstawieniu (4) i (2) do (1) można obliczyć objętość koła zamachowego:

$$V = \pi \cdot h \cdot (r_z^2 - r_w^2) = \frac{4W_{k \max}}{R_e} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{r_w}{r_z}\right)^2} \quad (5)$$

W celu minimalizacji objętości (masy) koła zamachowego należy wykonać je w postaci cienkościennego cylindra!

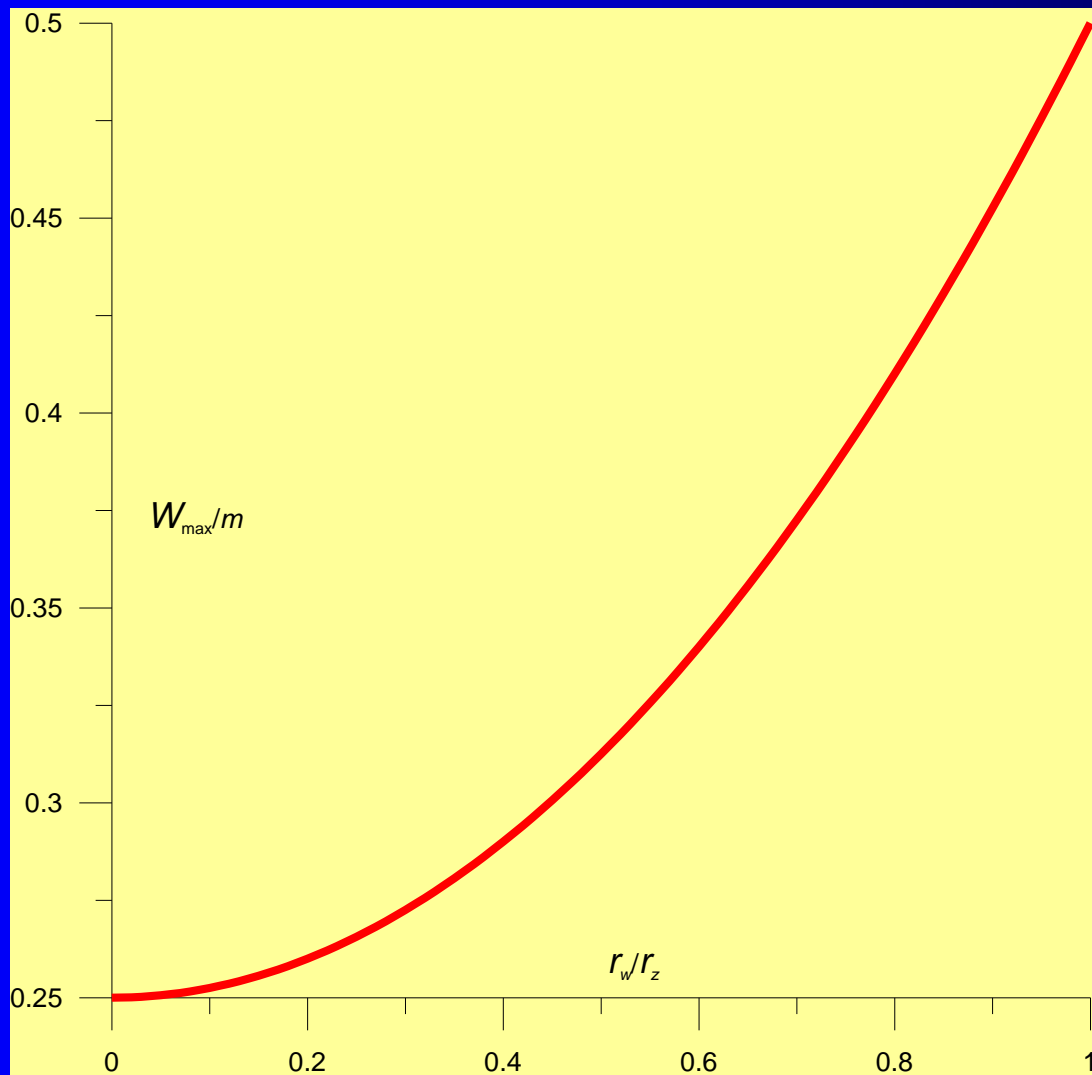
Z zależności (5) wynika stosunek granicznej wartości energii kinetycznej koła zamachowego do jego masy:

$$\frac{W_{k \max}}{m} = \frac{W_{k \max}}{\rho V} = \frac{R_e}{\rho} \cdot \frac{1 + \left(\frac{r_w}{r_z}\right)^2}{4} \quad (6)$$

WNIOSEK: wysokoobrotowe koło zamachowe powinno być wykonane z bardzo wytrzymałego materiału o możliwie małej masie właściwej.

Własności materiałów na koło zamachowe (bezwładnik)

	Gęstość Materiału	Wytrzymałość na rozrywanie	Graniczna prędkość obwodowa	Graniczna gęstość energii
	ρ [kg/m ³]	R_e [GPa]	v_{\max} [m/s]	W/m [MJ/kg]
stal	$7,8 \cdot 10^3$	1,8	480,4	0,23
tytan	$4,5 \cdot 10^3$	1,2	516	0,27
Kompozyt w. szklane	$2,0 \cdot 10^3$	1,6	894,4	0,8
Kompozyt w. węglowe	$1,5 \cdot 10^3$	2,4	1256	1,6



Względna gęstość energii w zależności od relacji pomiędzy średnicą wewnętrzną i zewnętrzną wydrążonego wirującego walca (6)

Porównanie granicznych wartości gęstości energii

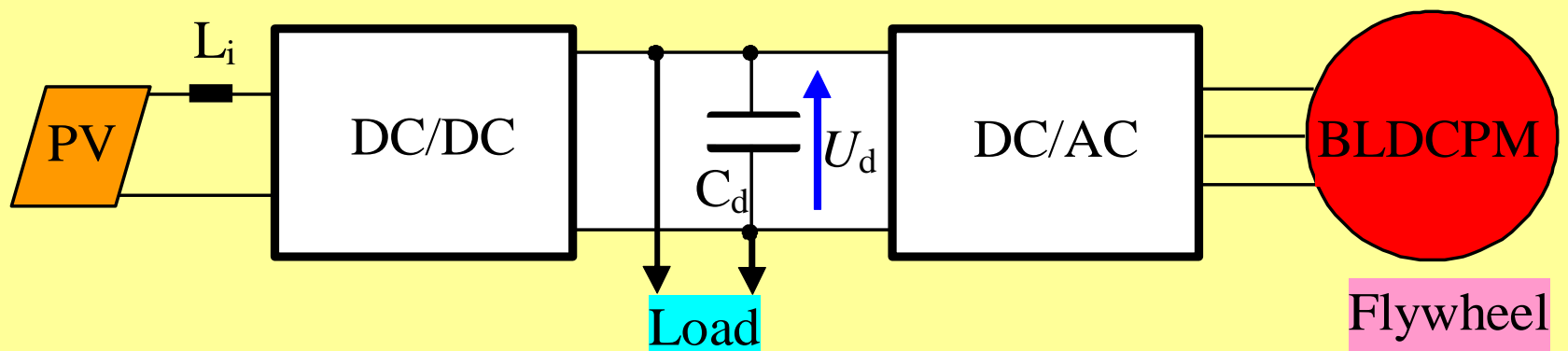
	W_{\max} / m [kJ/kg]
Kondensator (polietylen)	0,02
Cewka powietrzna (miedź)	2,78
Koło zamachowe (stal)	230
Koło zamachowe (kompozyt węglowy)	1600

Parametry magazynu energii

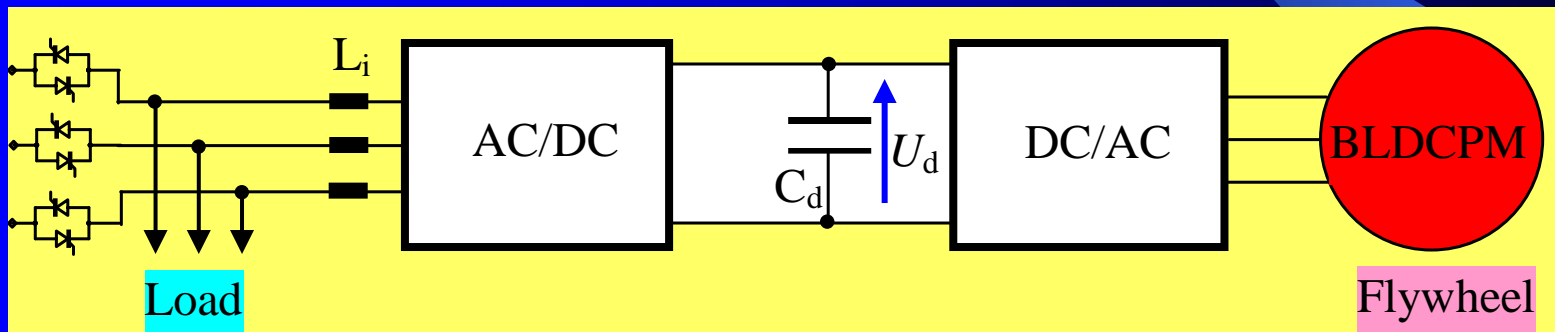
- Gęstość energii,
- Pojemność energetyczna magazynu,
- Sprawność ładowania i rozładowywania,
- Energetyczne koszty magazynowania na jednostkę czasu,
- Czas dostępu do zgromadzonej energii,
- Moc szczytowa

Przykłady zastosowania magazynów wirujących

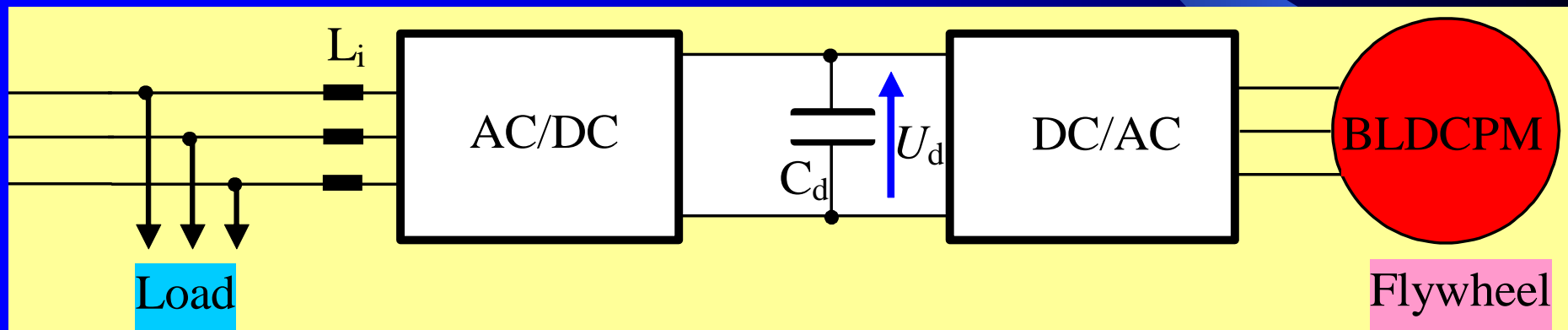
1. Obsługa alternatywnych źródeł energii elektrycznej



2. Bezprzerwowe zasilanie wybranych odbiorników prądu przemiennego



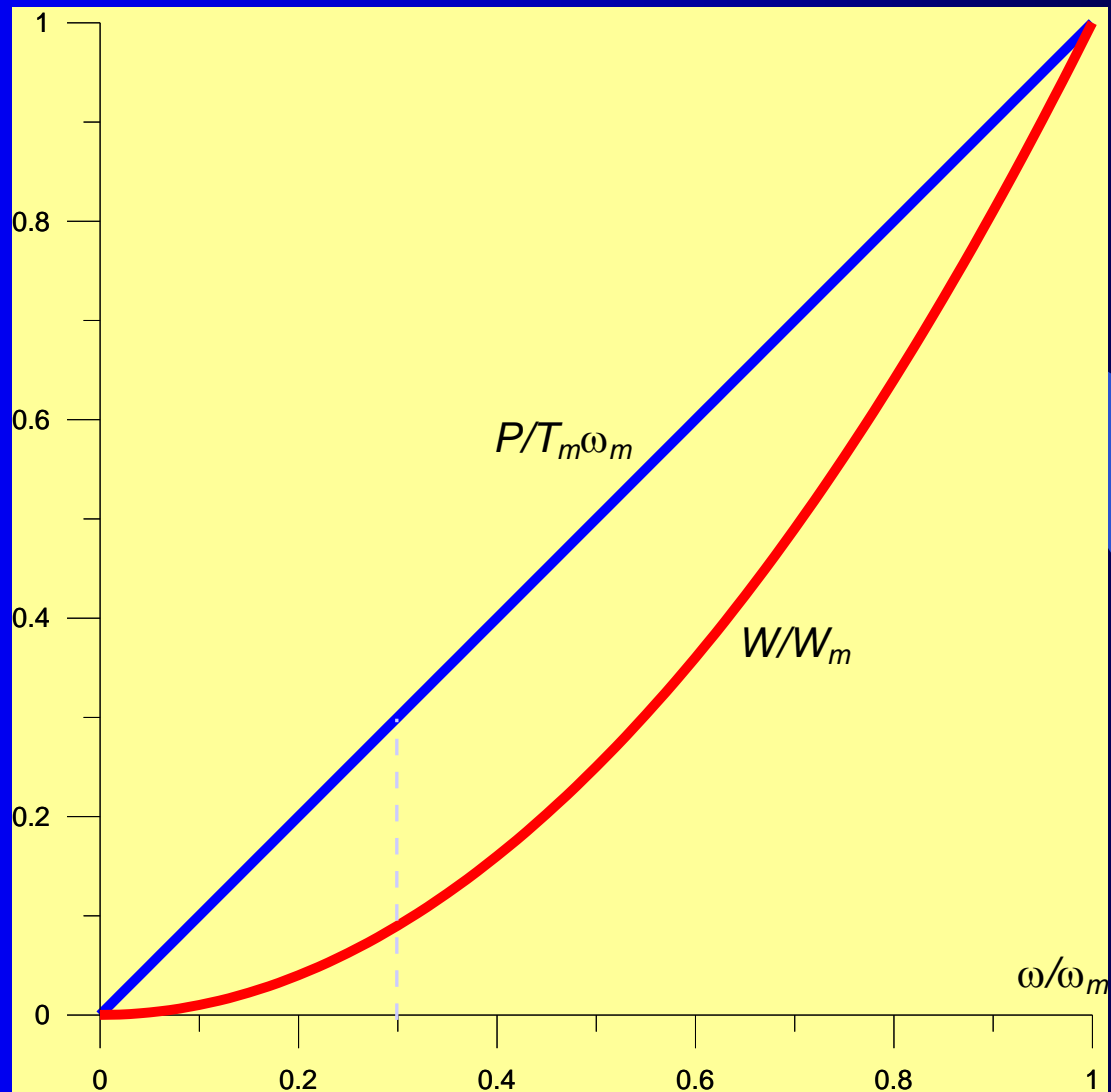
3. Kompensacja wahań obciążeń czynnych i stabilizacja napięcia



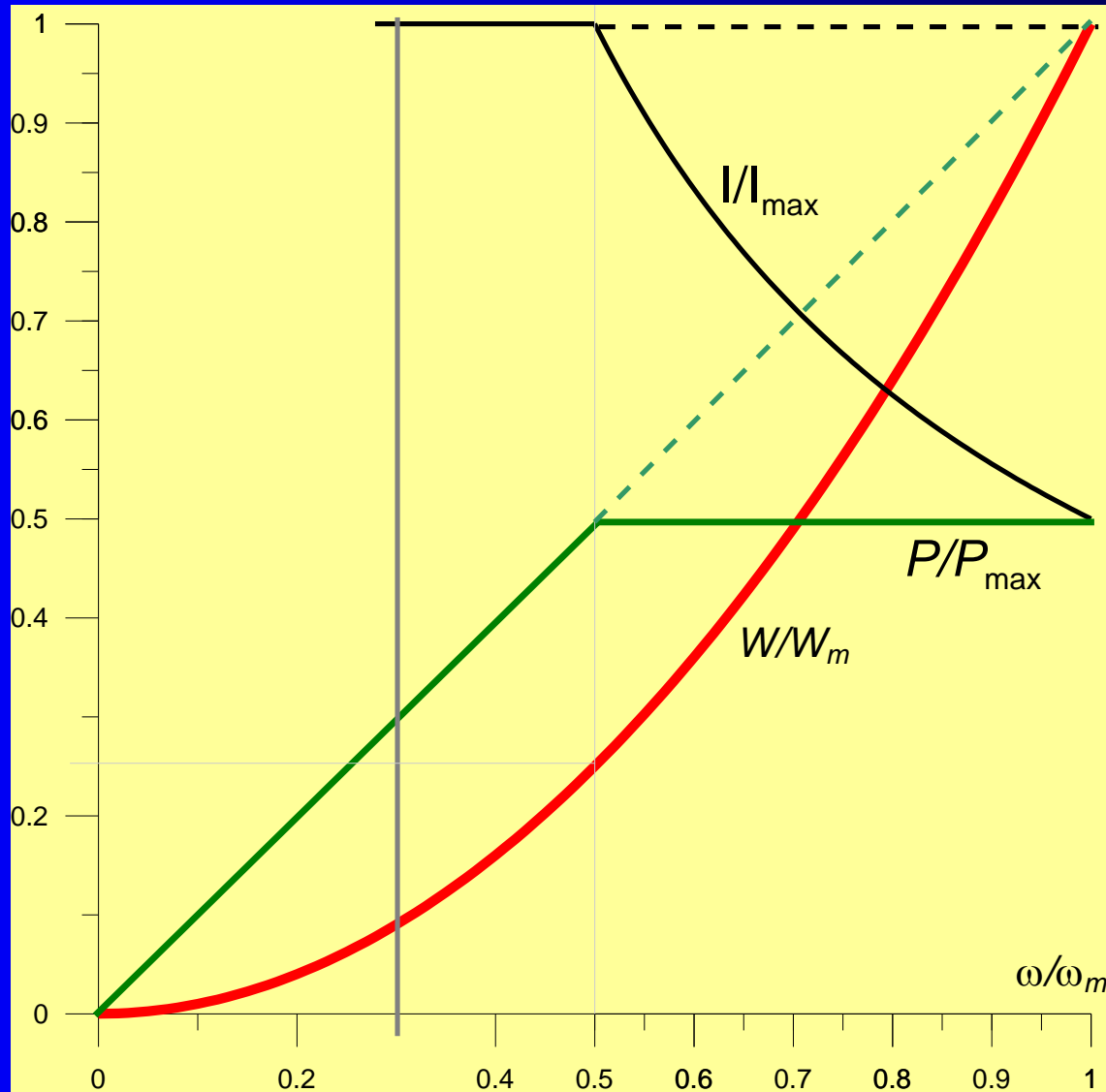
Wymagane energie i moce zasobników

	Zastosowanie	Maksymalna energia W_{\max} [MJ]	Moc szczytowa P_{\max} [kW]
1	Układy do poprawy jakości energii elektrycznej (kompensacja szczytowych obciążeń czynnych)	5÷20	100÷1000
2	Autobus hybrydowy (spalinowo elektryczny)	7÷9	100÷120
3	Autonomiczna elektrownia alternatywna dla obsługi jednego gospodarstwa domowego	7÷9	3
4	Pociąg podmiejski	70	1000
5	Pociąg dalekobieżny	500	2000

Energia i moc zasobnika wirującego



Praca zasobnika wirującego ze stałą mocą i stałym momentem (prądem)



Elektromechaniczne akumulatory wysokoobrotowe

Prędkości wirowania: $20 \cdot 10^3 \div 60 \cdot 10^3$ obr/min,

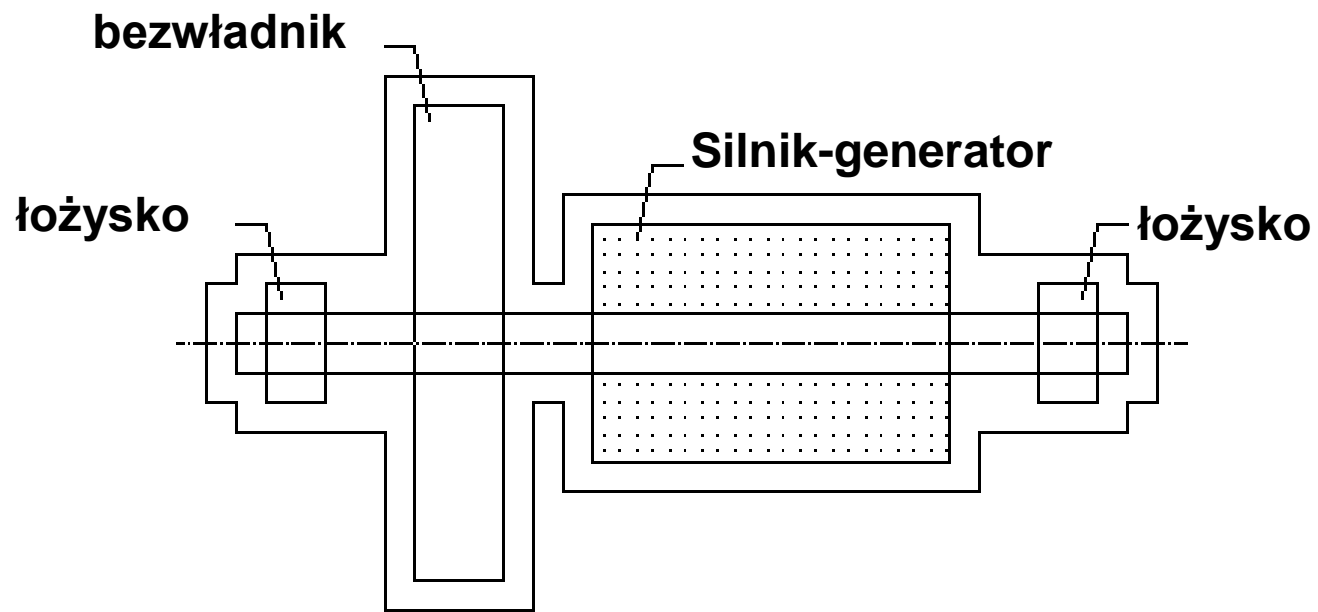
Łożyska magnetyczne,

Wysokosprawne przekształtniki energoelektroniczne,

Pośredniczący obwód prądu stałego; możliwość łączenia równoległego lub/i szeregowego,

Próżnia (hel),

Wytrzymała obudowa.



Wirujący zasobnik energii

Maszyny elektryczne do wysokoobrotowych zasobników energii

- **Maszyny indukcyjne klatkowe**

- Nie występują straty biegu jałowego (wirowanie koła zamachowego bez wymiany energii),
- Konieczność wstępnego wzbudzenia (dla przejścia do pracy generatorowej) z zewnętrznego źródła energii,
- Prosta konstrukcja wirnika.
- Trudno wykonywać wysokoobrotowe maszyny jednobiegunowe,
- Trudno realizować modulację PWM ze względu na potrzebę uzyskania napięcia zasilającego o relatywnie wysokiej częstotliwości (wysokoobrotowe maszyny dwubiegunowe).

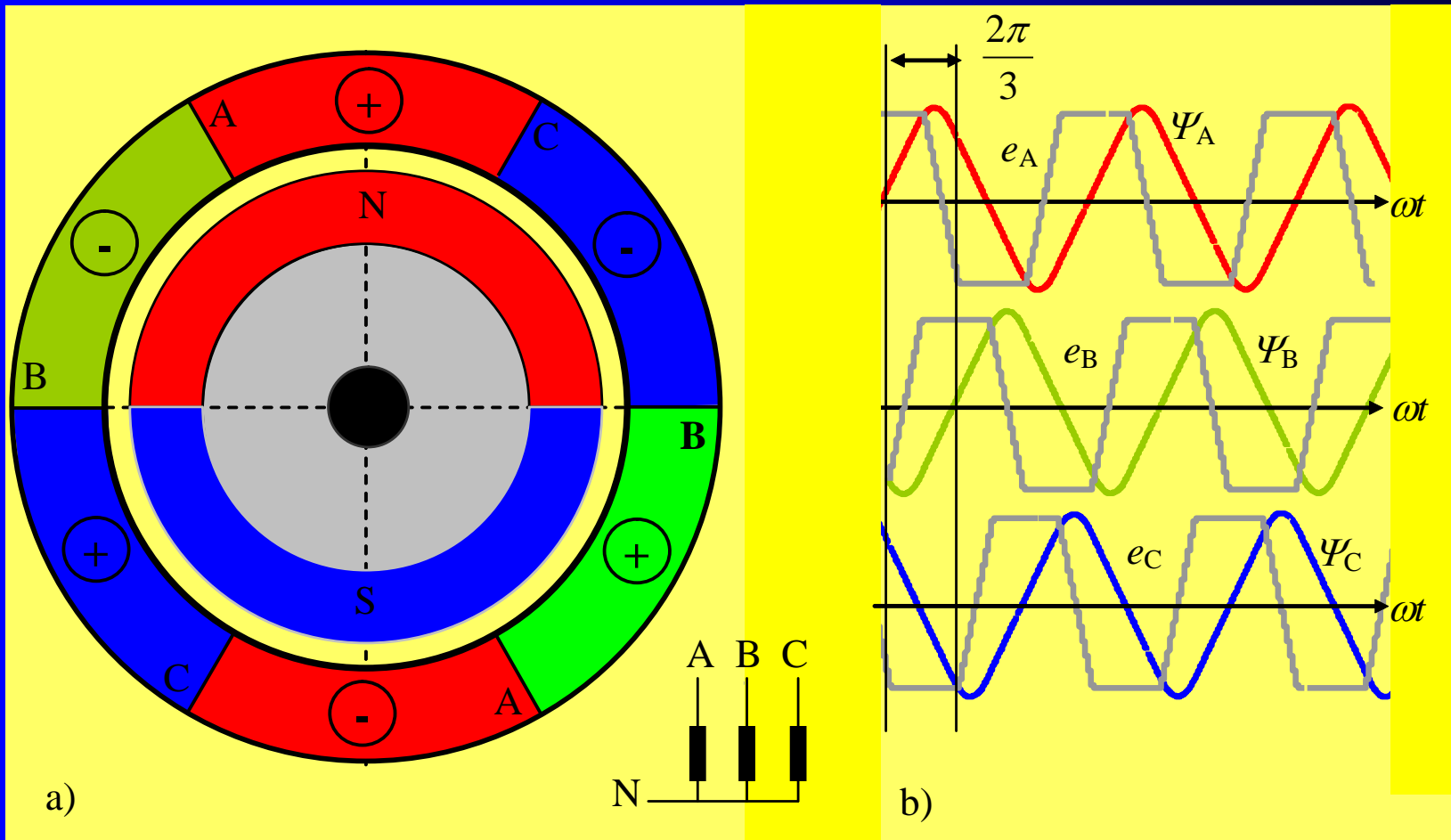
- **Maszyny ze wzbudzeniem obcym (odpowiednik maszyny synchronicznej)**

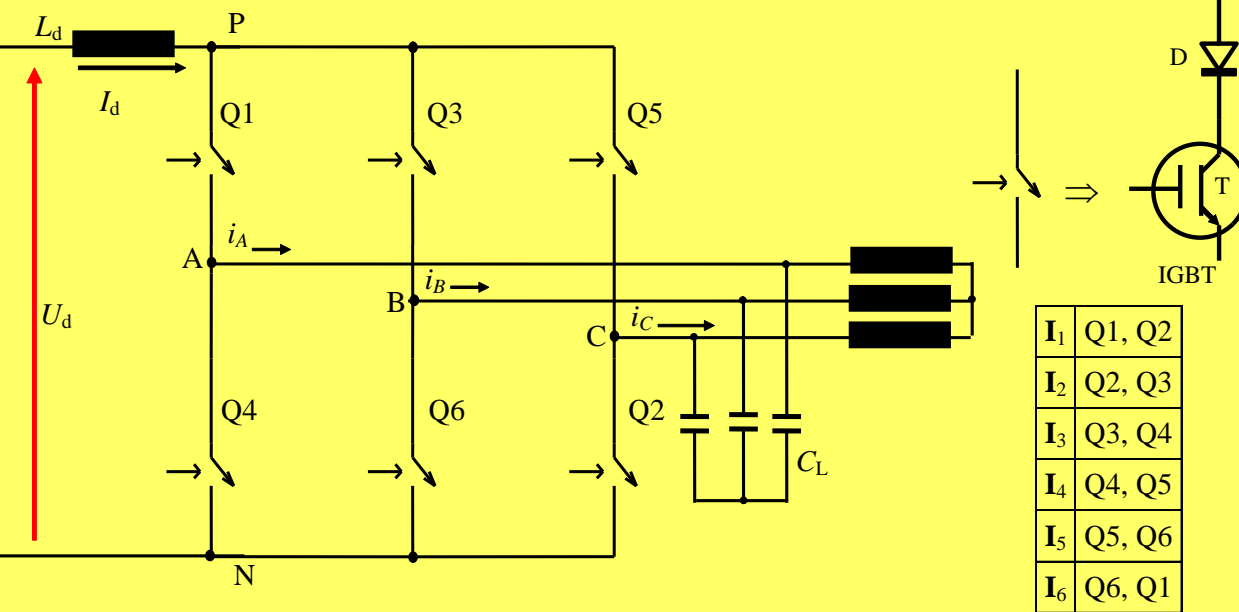
- Konieczność wstępnego wzbudzenia (dla przejścia do pracy generatorowej) z zewnętrznego źródła energii,
- Nie występują straty biegu jałowego (wirowanie koła zamachowego bez wymiany energii),
- Złożona konstrukcja wirnika.
- Trudno wykonywać wysokoobrotowe maszyny jednobiegunowe,
- Trudno realizować modulację PWM ze względu na potrzebę uzyskania napięcia zasilającego o relatywnie wysokiej częstotliwości (wysokoobrotowe maszyny dwubiegunowe).

- **Bezszcotkowa maszyna prądu stałego o magnesach trwałych (BLPMDCM)**
 - Wysoka sprawność (brak prądu magnesującego)
 - Prosta konstrukcja uzwojenia
 - Łatwe sterowanie i modulacja PWM,
 - Występują straty biegu jałowego (wirowanie koła zamachowego bez wymiany energii) w wyniku wirowania magnesów w środowisku przewodzącym,
 - Duża moc z jednostki wagi.

- **Maszyna o magnesach trwałych synchroniczna (o sinusoidalnych przebiegach napięć wewnętrznych)**
 - Wysoka sprawność (brak prądu magnesującego)
 - Trudniejsze do wykonania uzwojenie statora,
 - Trudno realizować modulację PWM ze względu na potrzebę uzyskania napięcia zasilającego o relatywnie wysokiej częstotliwości (wysokoobrotowe maszyny dwubiegunowe).
 - Występują straty biegu jałowego (wirowanie koła zamachowego bez wymiany energii) w wyniku wirowania magnesów w środowisku przewodzącym,
 - Duża moc z jednostki wagi.

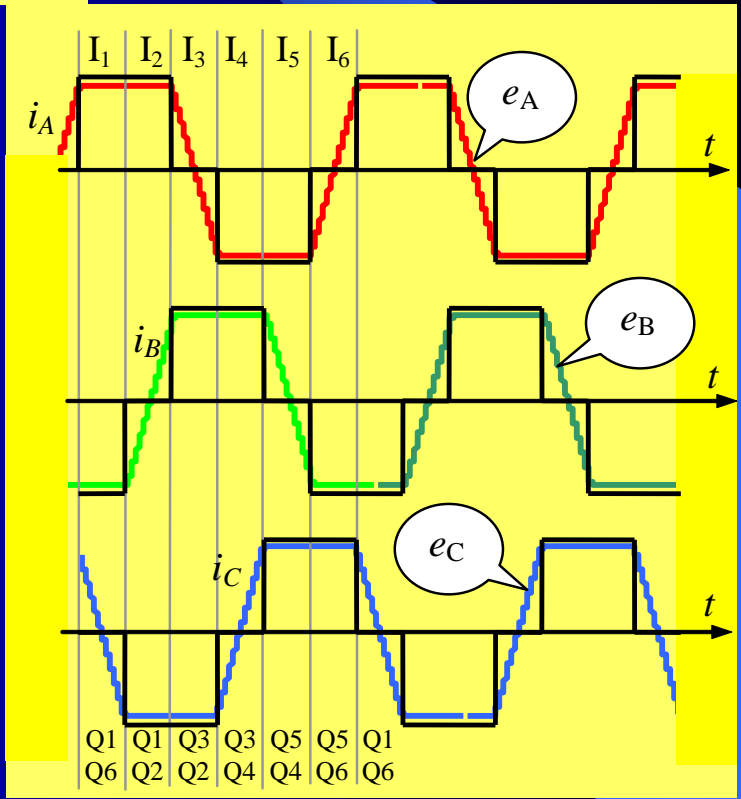
Maszyna elektryczna bezszczotkowa z magnesami trwałymi BLDCPM



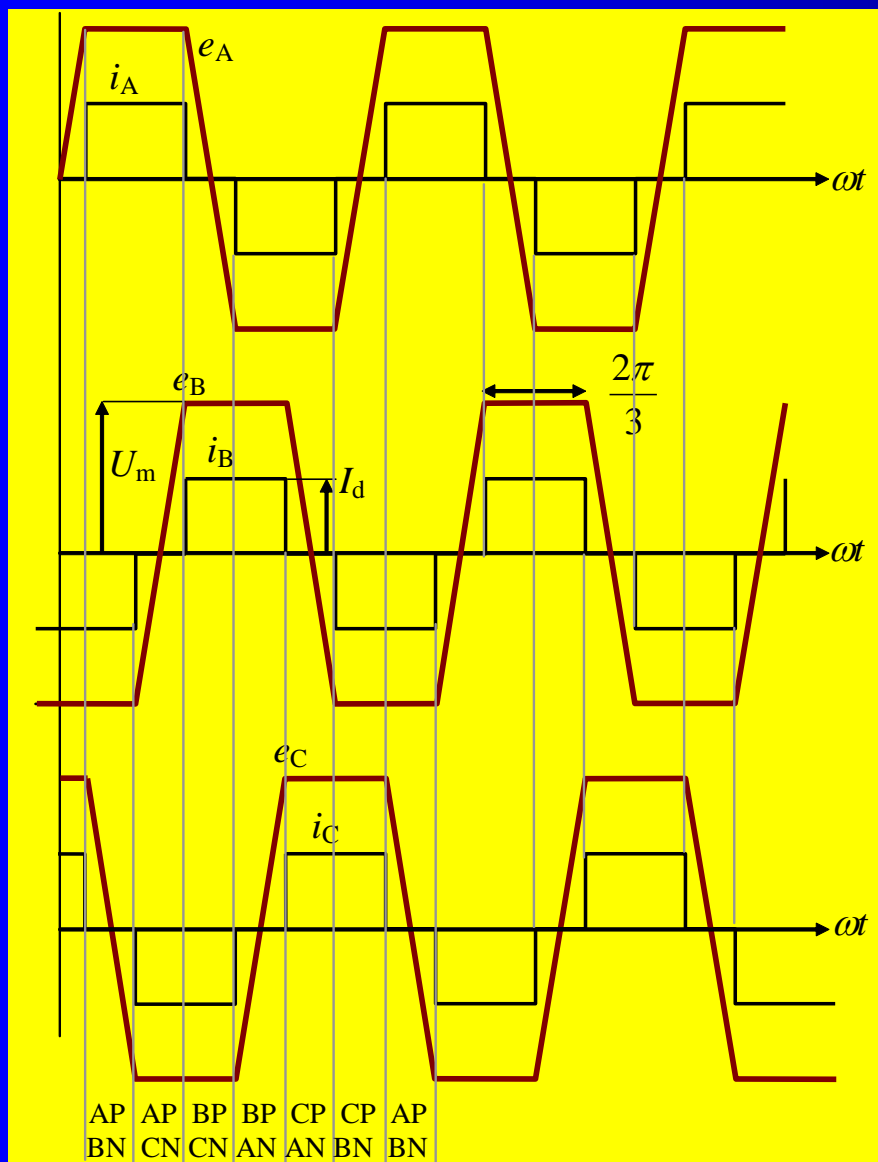


Trójfazowy falownik prądu zasilający bezszczotkową maszynę prądu stałego

Wyidealizowane przebiegi prądów fazowych bezszczotkowej maszyny o magnesach trwałych

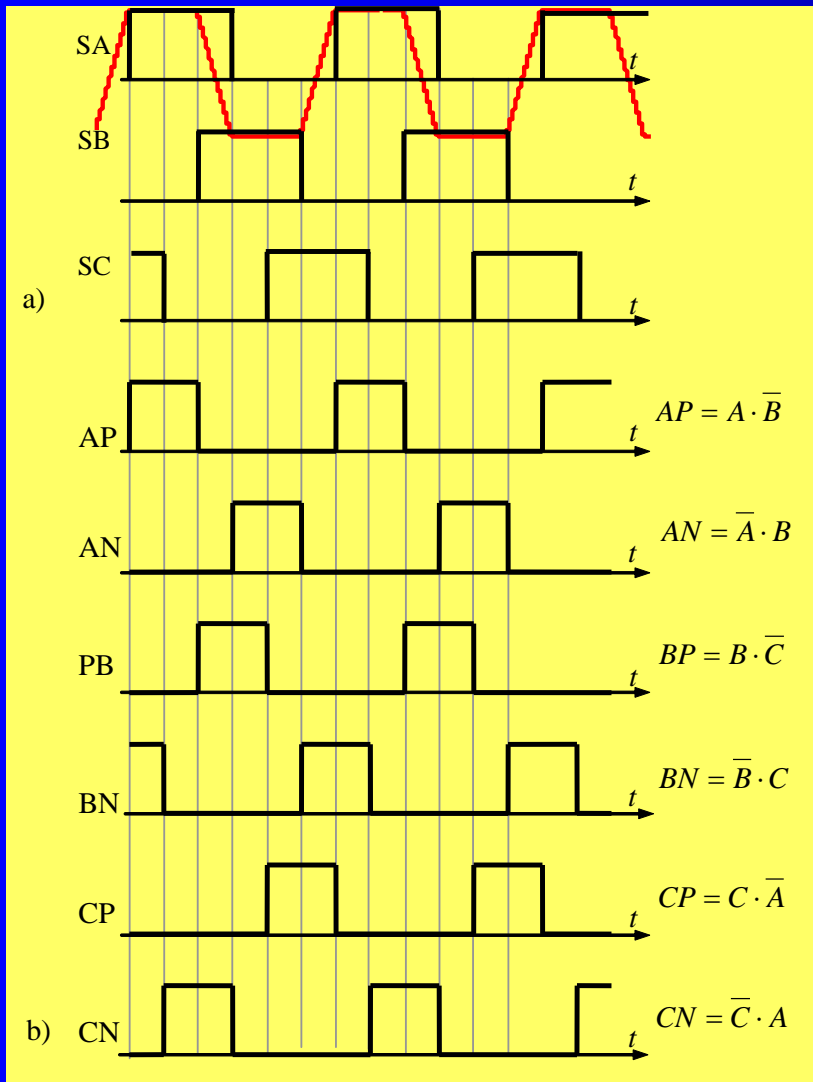


Wyidealizowane przebiegi napięć i prądów maszyny BLDCPM



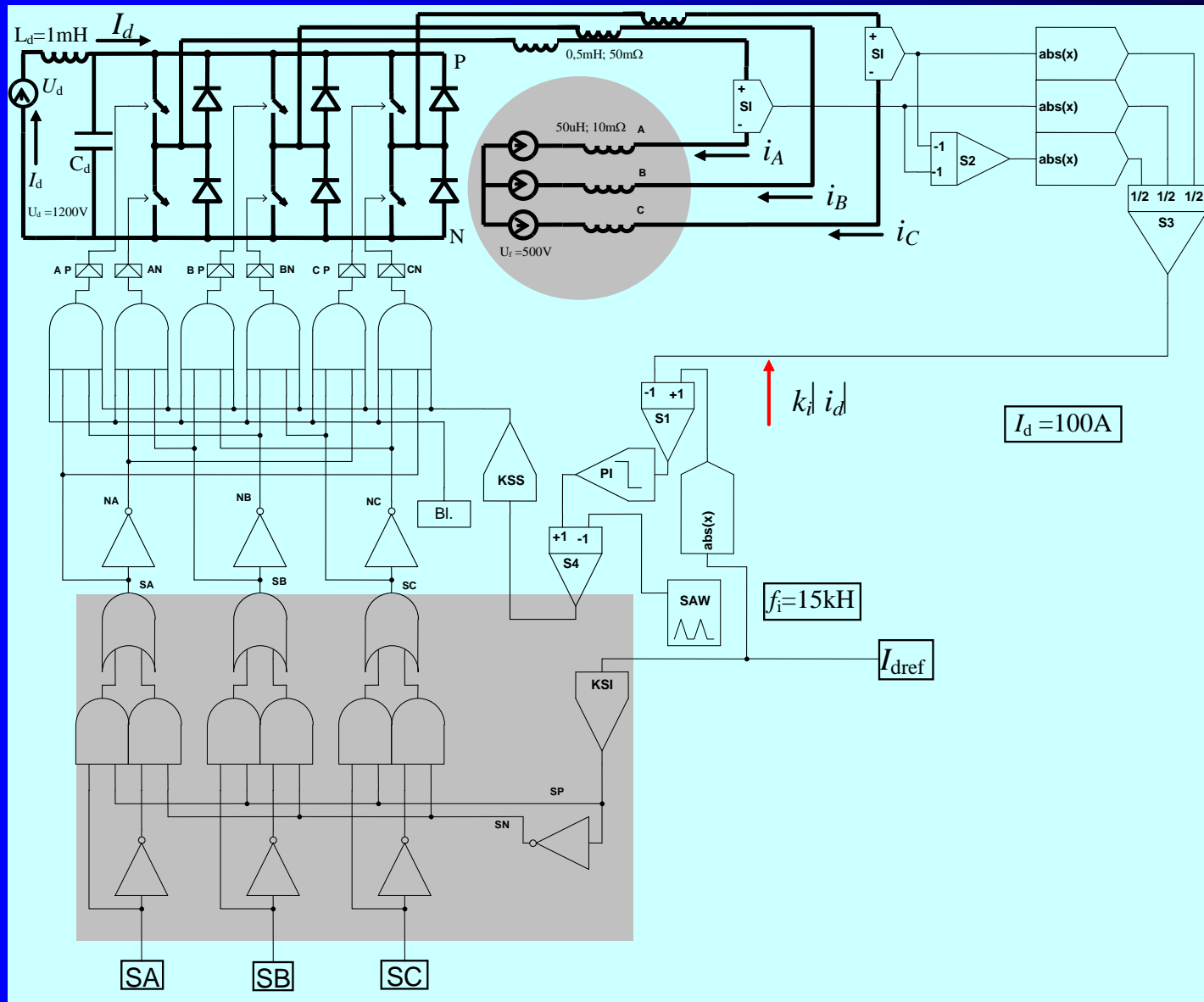
$$P_e = 2U_m I_d = T_m \omega$$

$$P_m = T_m \omega = \text{const}$$



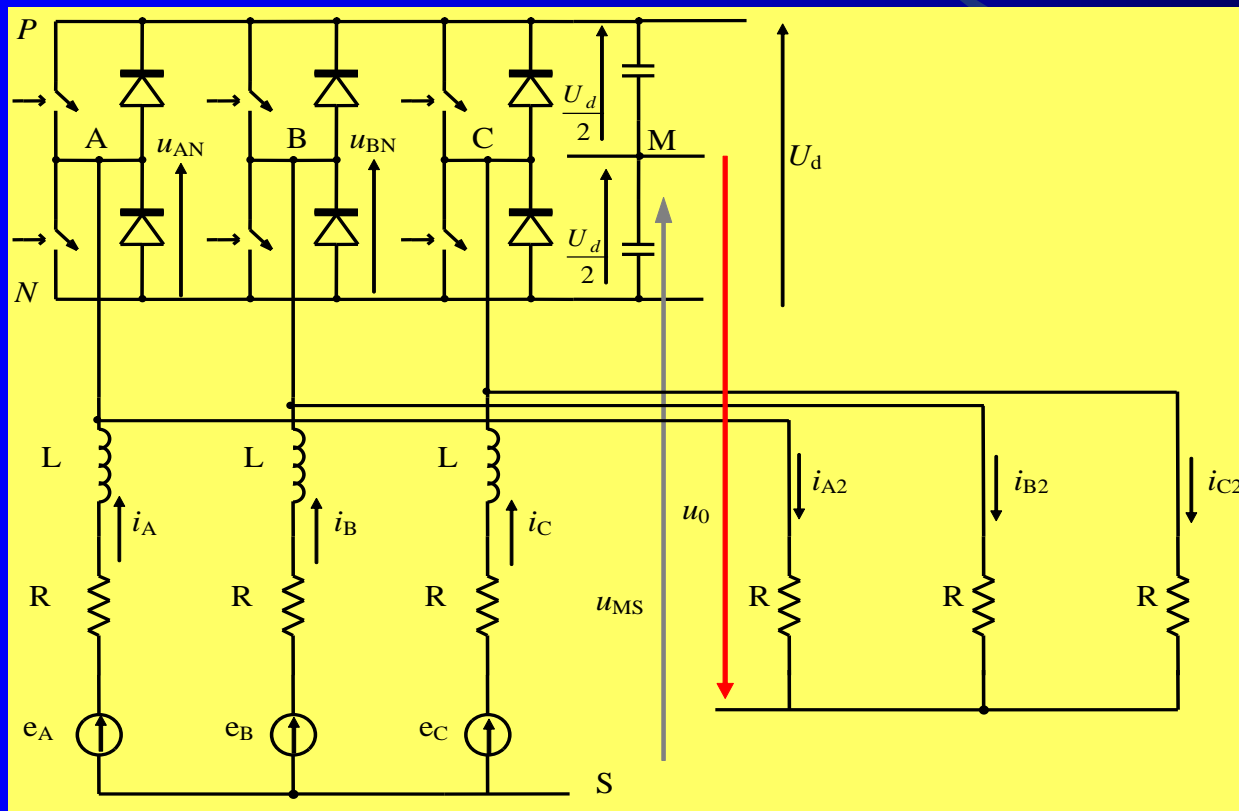
- a) Impulsy czujnika położenia wirnika,
 b) Przedziały czasu, w których impulsowane są poszczególne łączniki trójfazowego falownika napięciowego kształtującego przebiegi prądów bezszotkowego silnika prądu stałego

Przekształtnik energoelektroniczny wraz z układem sterowania i regulacji



Układ regulacji kontroluje zastępczy prąd stały mierzony jako suma modułów prądów fazowych silnika lub jako moduł prądu w obwodzie pośredniczącym prądu stałego.

Położenie wirnika może być wyznaczone na podstawie impulsów z hallotronów lub na podstawie składowej zerowej (trzeciej harmonicznej) napięć fazowych silnika.



Sposób wyznaczania składowej kolejności zerowej napięcia maszyny

W ogólnym przypadku, dla maszyny zasilanej z falownika, można zapisać:

$$e_A - L \frac{di_A}{dt} - Ri_A - u_{AN} + \frac{U_d}{2} - u_{MS} = 0$$

$$e_B - L \frac{di_B}{dt} - Ri_B - u_{BN} + \frac{U_d}{2} - u_{MS} = 0$$

$$e_C - L \frac{di_C}{dt} - Ri_C - u_{CN} + \frac{U_d}{2} - u_{MS} = 0$$

Dla gwiazdy złożonej z rezystorów zachodzi:

$$Ri_{A2} - u_{AN} + \frac{U_d}{2} + u_0 = 0$$

$$Ri_{B2} - u_{BN} + \frac{U_d}{2} + u_0 = 0$$

$$Ri_{C2} - u_{CN} + \frac{U_d}{2} + u_0 = 0$$

Stąd:

$$e_A - L \frac{di_A}{dt} - Ri_A - Ri_{A2} - u_{MS} = u_0$$

$$e_B - L \frac{di_B}{dt} + Ri_B - Ri_{B2} - u_{MS} = u_0$$

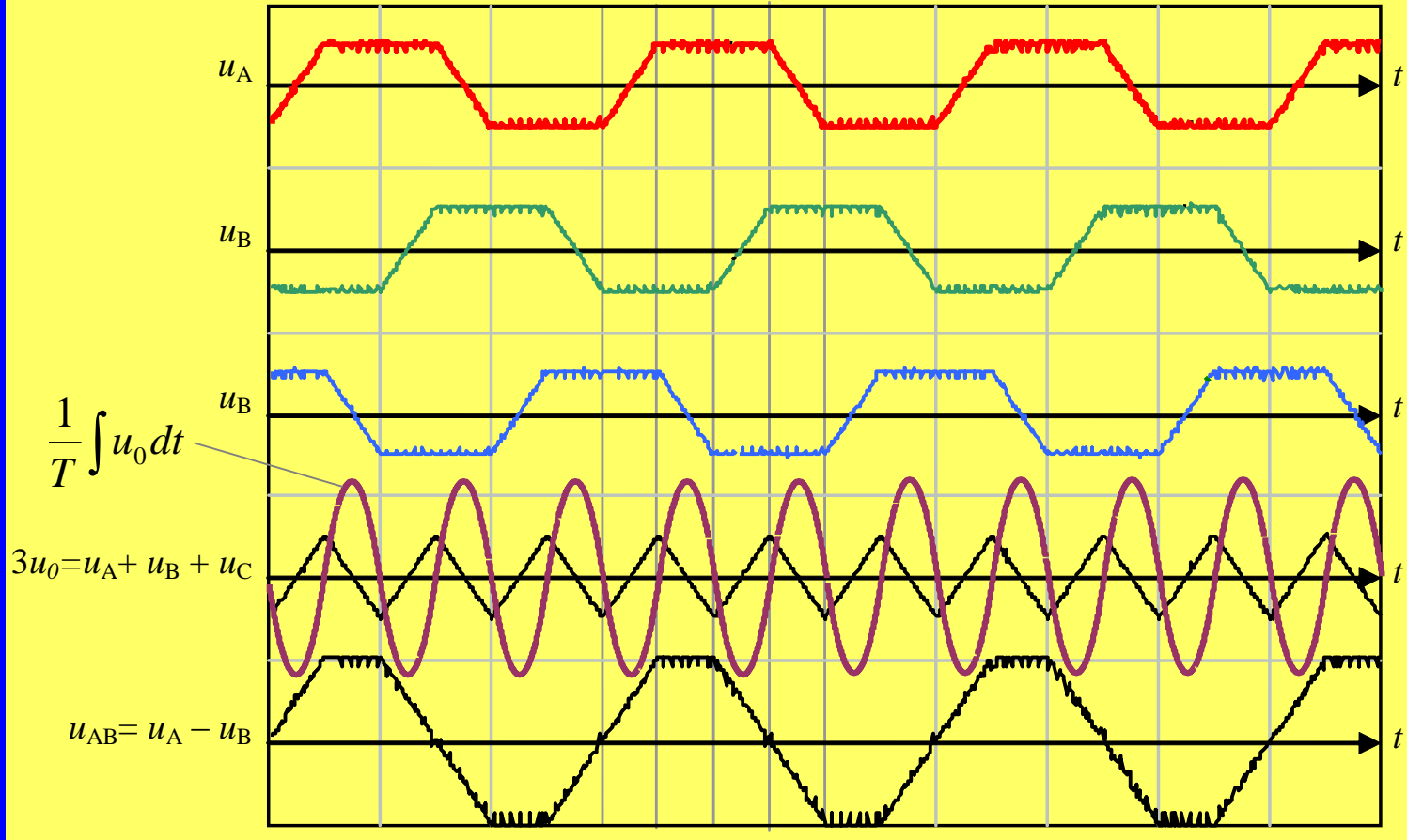
$$e_C - L \frac{di_C}{dt} + Ri_C - Ri_{C2} - u_{MS} = u_0$$

Czyli:

$$e_A + e_B + e_C - 3u_{MS} = 3u_0$$

Dla $u_{MS} = 0$ otrzymuje się:

$$u_0 = \frac{e_A + e_B + e_C}{3}$$

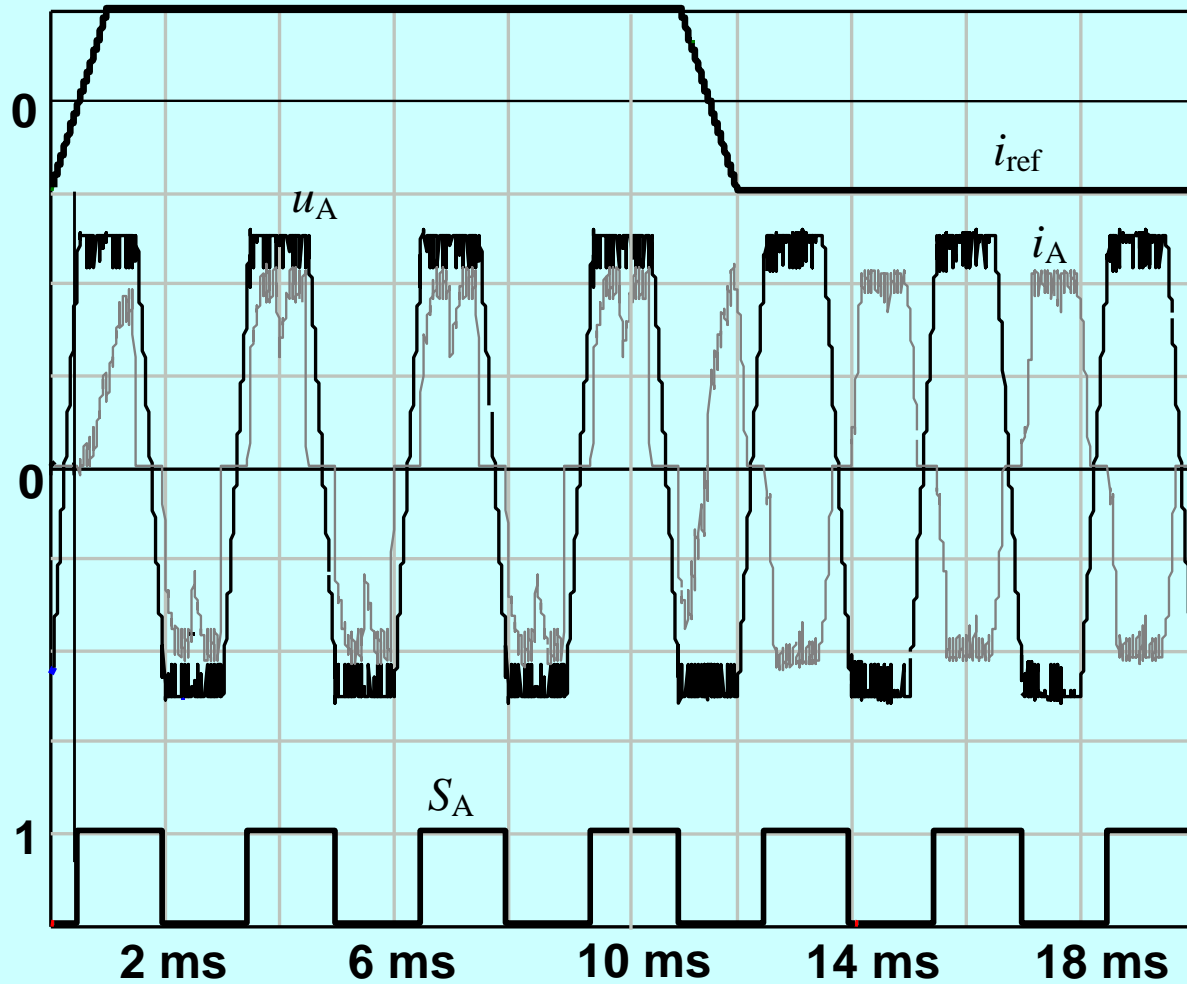


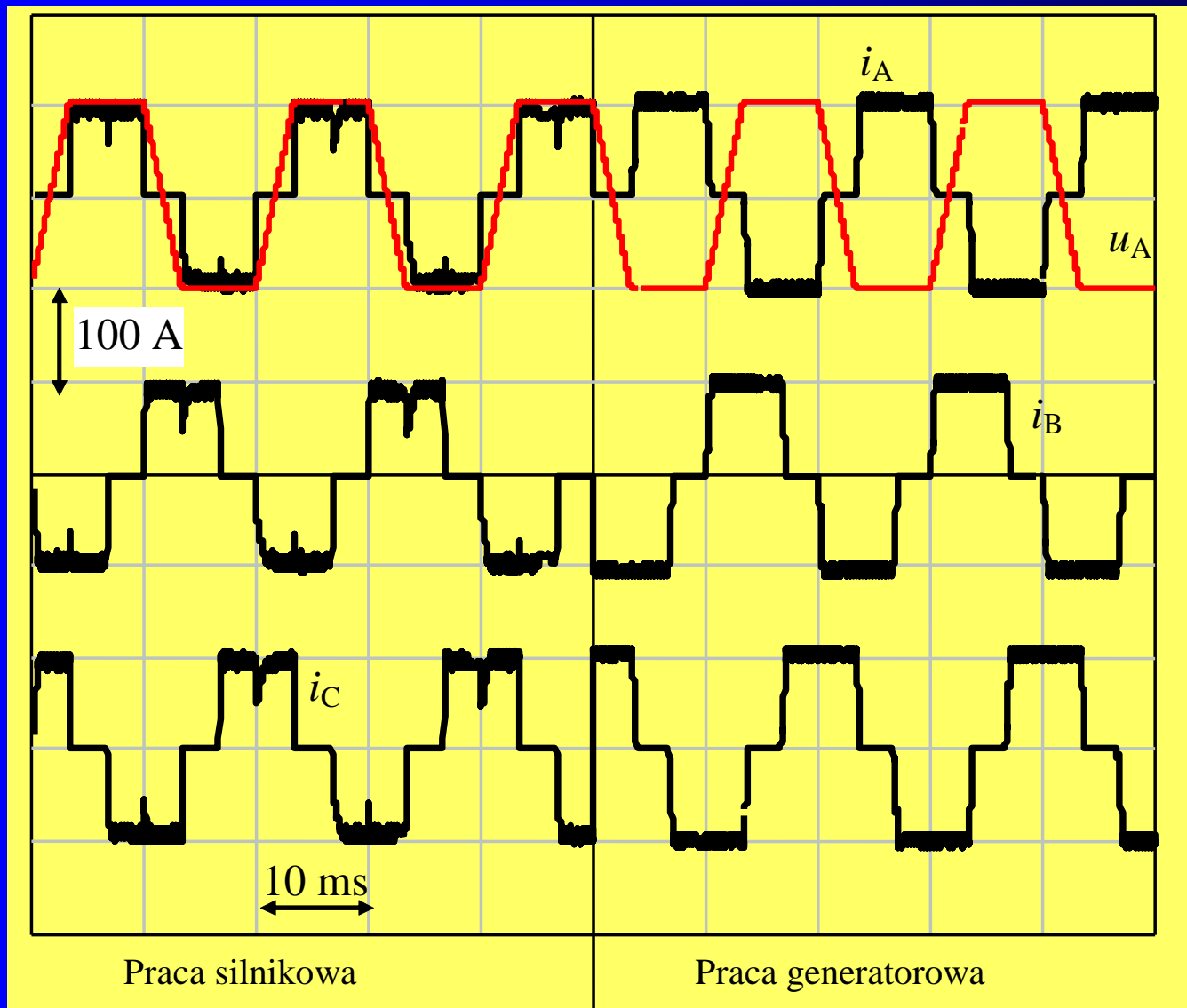
Przebiegi napięć fazowych, składowej kolejności zerowej i jednego napięcia międzyfazowego maszyny bezszczotkowej prądu stałego

W chwilach przełączeń faz maszyny przebieg składowej zerowej jej napięcia przechodzi przez wartość szczytową, a całka z tego napięcia przechodzi przez zero.

Zerowanie się tej całki może być wykorzystane do przełączeń kolejnych faz maszyny

Przebiegi napięć i prądów maszyny BLPMDCM





Przebiegi prądów fazowych maszyny bezszczotkowej i skokowe przejście z pracy silnikowej na pracę generatorową



Magnesy do tarczowych silników BLPMDCM przeznaczonych do wysokoobrotowego zasobnika energii, opracowane i wykonane w Politechnice Warszawskiej (Instytut Maszyn Elektrycznych)



Stanowisko badawcze wirującego zasobnika energii z maszyną BLPMDCM wykonane w laboratorium Katedry Automatyki Napędu i Urządzeń Przemysłowych AGH w Krakowie



However be warned, not every composite rotor must fail harmless. They can fail quite unfriendly and dangerous as well.



The safety of the system is not only related to the rotor alone. The housing, and all other parts and materials within influence the result of a burst quite significantly.

Energia niezbędna dla poruszania samochodu

Energia zgromadzona w paliwie (50 litrów benzyny o gęstości energii 30 MJ/l)

$$W_p = 50 \cdot 30 \cdot 10^6 = 1,5 \text{ GJ}$$

Przy sprawności silnika cieplnego $\eta=0,2$ z jednego baku paliwa do napędu przekazywana jest energia:

$$W_m = 0,2 \cdot 1,5 \cdot 10^9 = 300 \cdot 10^6 = 300 \text{ MJ}$$

Taki zapas paliwa umożliwia przejazd ok. 700 km

Koło zamachowe o masie 45 kg wirujące w próżni, wykonane z materiału kompozytowego o $\rho=1,5 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$, $R_e = 2\text{GPa}$ w objętości materiału pierścienia $V=45 \text{ [kg]} / (1,5 \cdot 10^3 \text{ [kg/m}^3]) = 0,03\text{m}^3$ gromadzi energię:

$$W_{\max} = \frac{V \cdot R_e}{2} = \frac{0,03 \cdot 2 \cdot 10^9}{2} = 0,03 \cdot 10^9 = 30 \cdot 10^6 = 30 \text{ MJ}$$

Zakładając możliwość odzyskania 90% energii oraz kompensacje strat własnych przez energię odzyskiwaną podczas hamowania samochodem z zasobnikiem można przejechać dystans:

$$0,9 \cdot \frac{30}{300} \cdot 700 = 63 \text{ km}$$

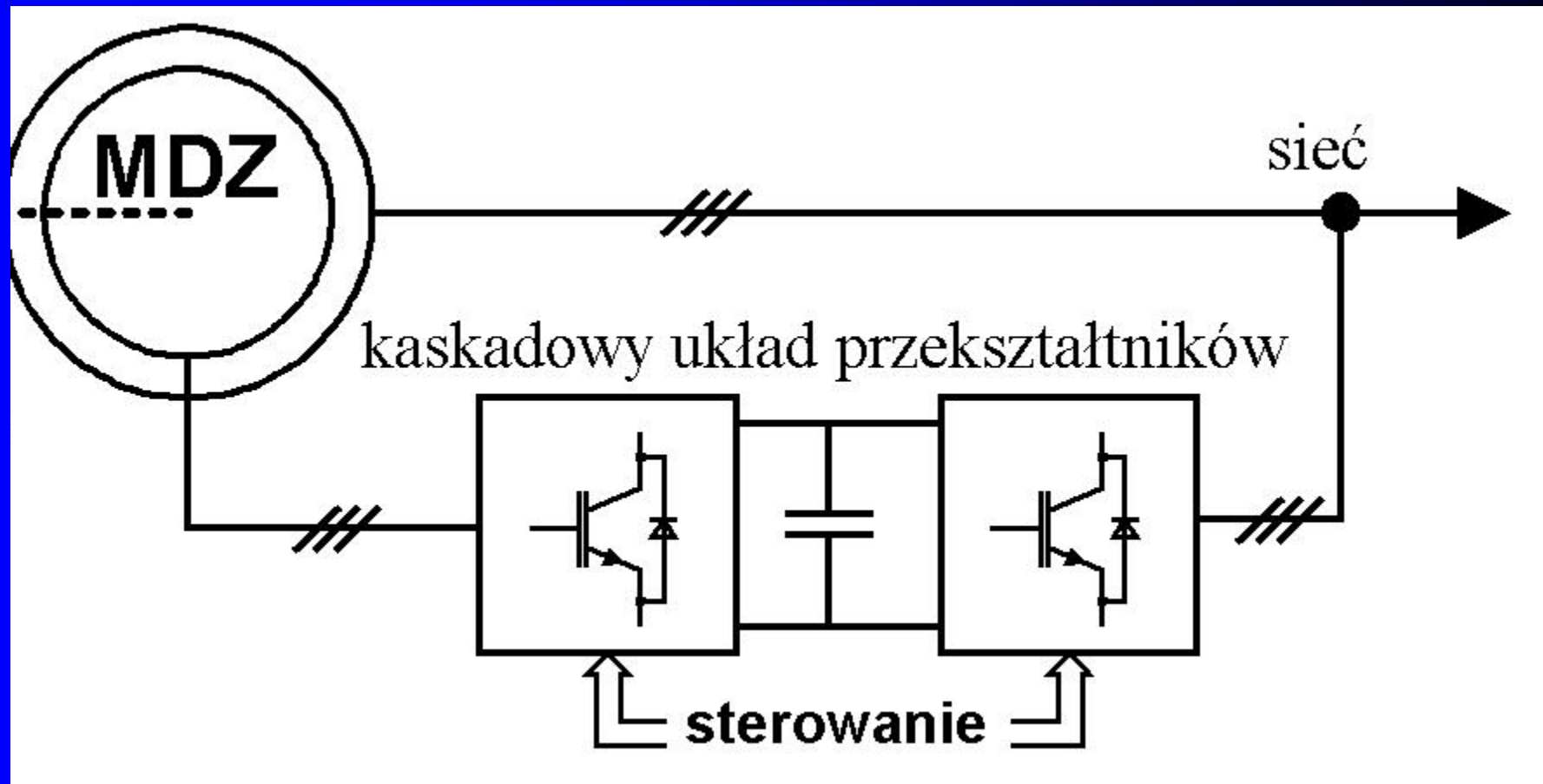
Wirujące magazyny (akumulatory) niskoobrotowe

Prędkości obrotowe 500 ÷ 900 obr/min,
Maszyny asynchroniczne pierścieniowe
dwustronnie zasilane; brak pośredniczącego
układu prądu stałego,

Gromadzona energia do 200 MJ, szczytowa
moc do 20 MW.

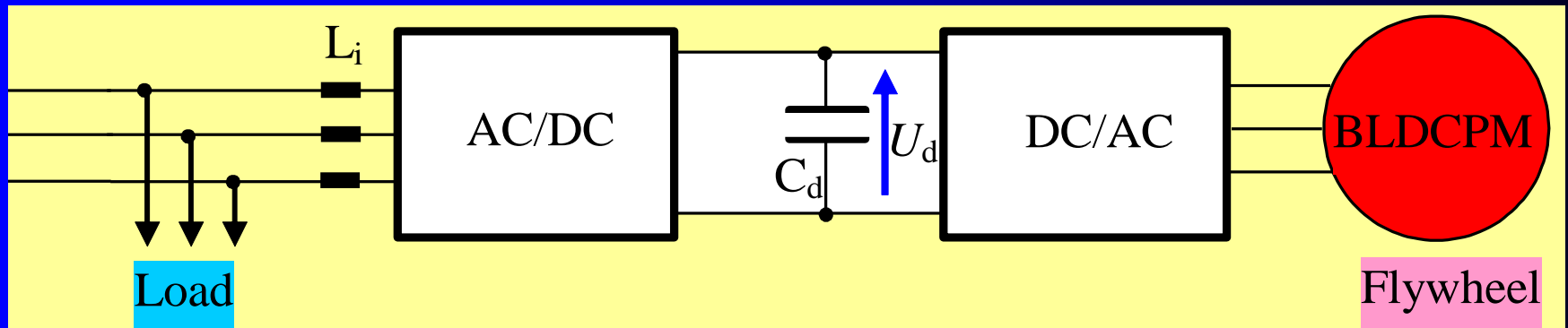
Przykład: bezwładnik $m = 74\ 000$ kg, $D = 4$ m,
 $n_{\max} = 700$ obr/min, $P_{\max} = 20$ MW, $W_{\max} = 200$ MJ
 $= 55$ kWh

Okinawa Electric Power Company



Maszyna asynchroniczna pierścieniowa dwustronnie zasilana

Stanowisko badawcze



$$W_{\max} = 7 \div 9 \text{ MJ} \quad (1,94 \div 2,5 \text{ kWh})$$

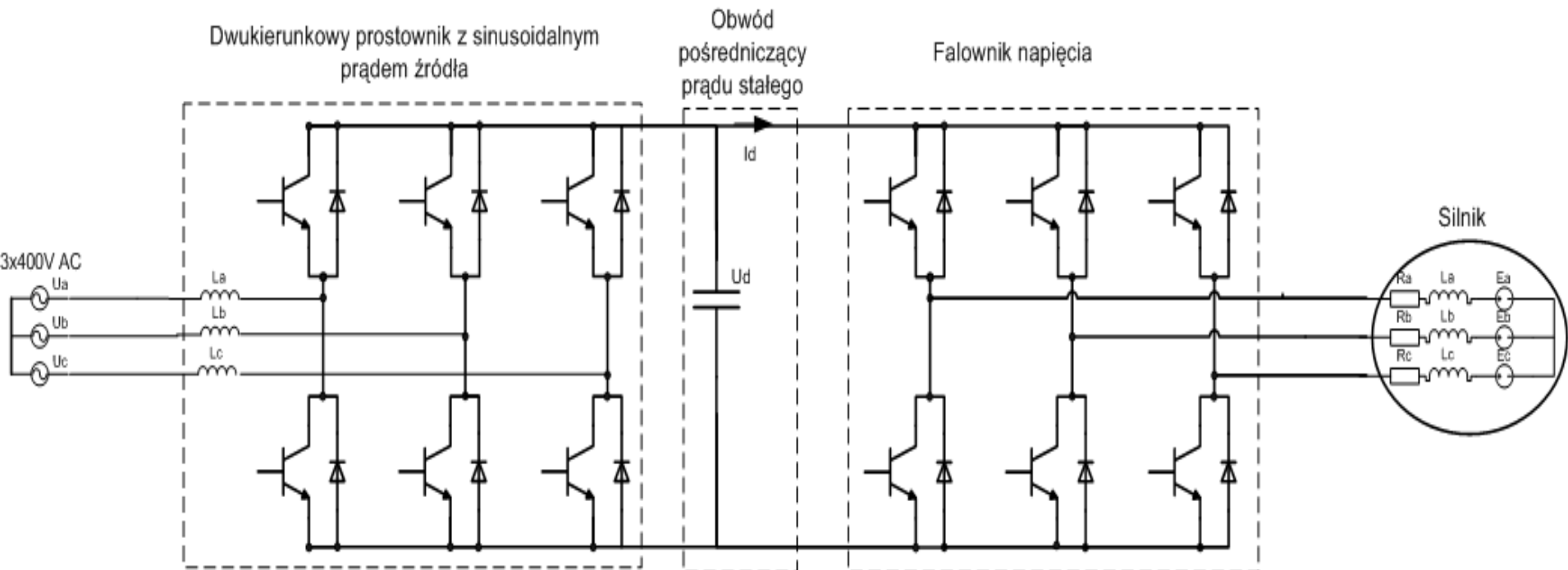
$$P_{\max} = 100 \text{ kW}$$

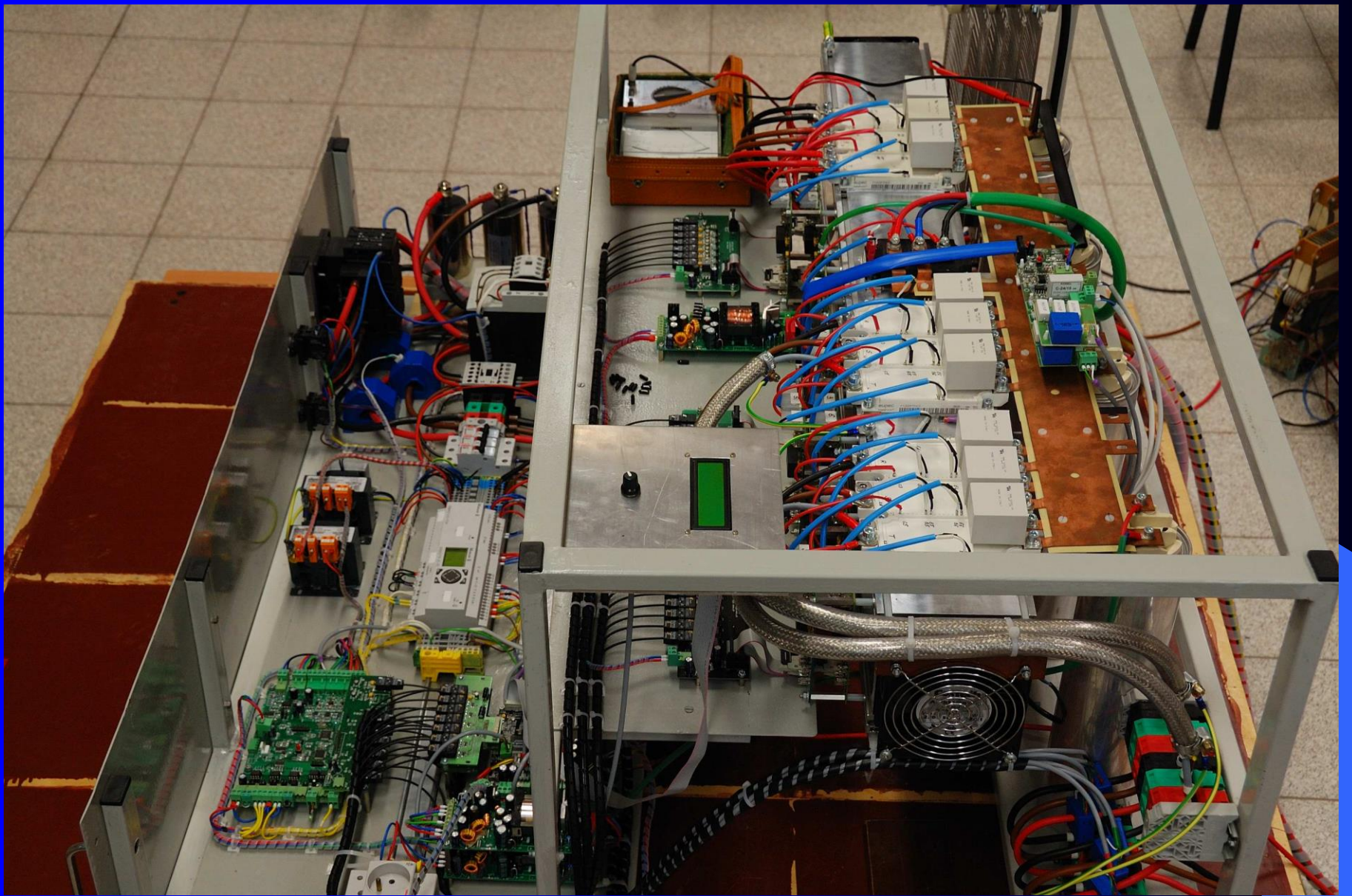
$$n_{\max} = 40\,000 \text{ obr/min} \quad (\omega_{\max} = 4200 \text{ 1/s})$$

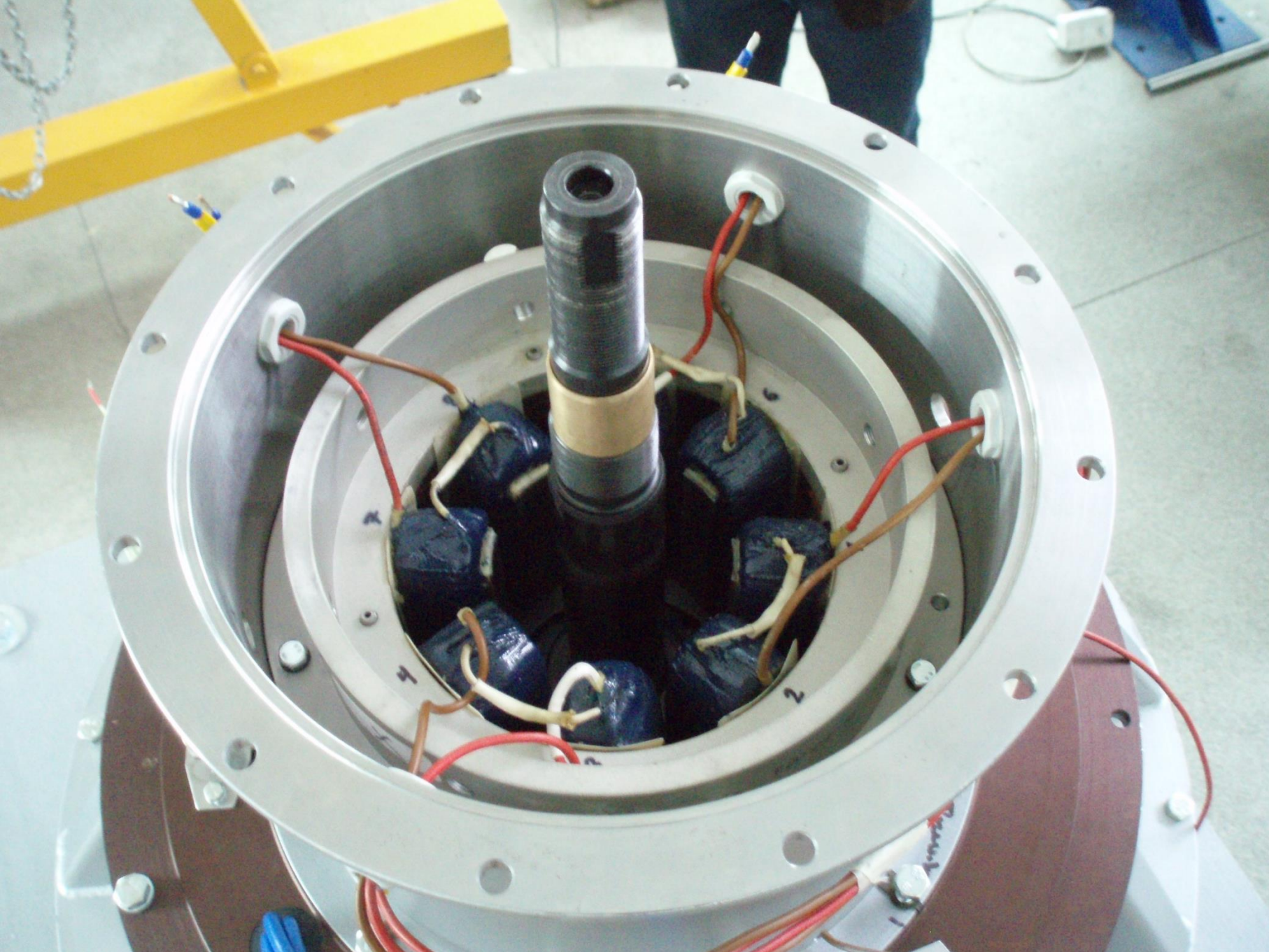
$$\text{Częstotliwość wirowania: } f_{\max} = 666,7 \text{ Hz}$$

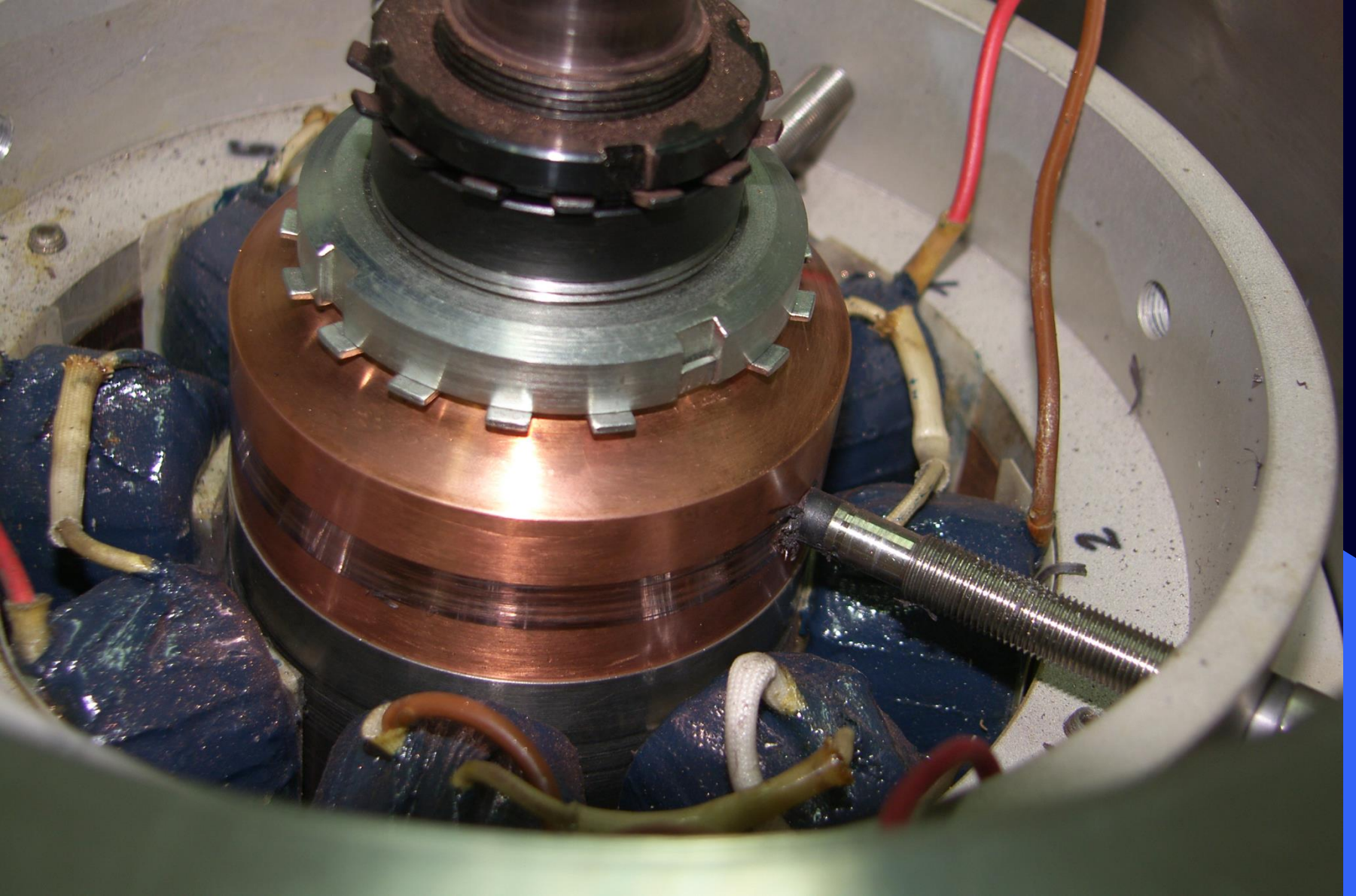
$$\text{Częstotliwość napięcia maszyny } (2p=4)$$

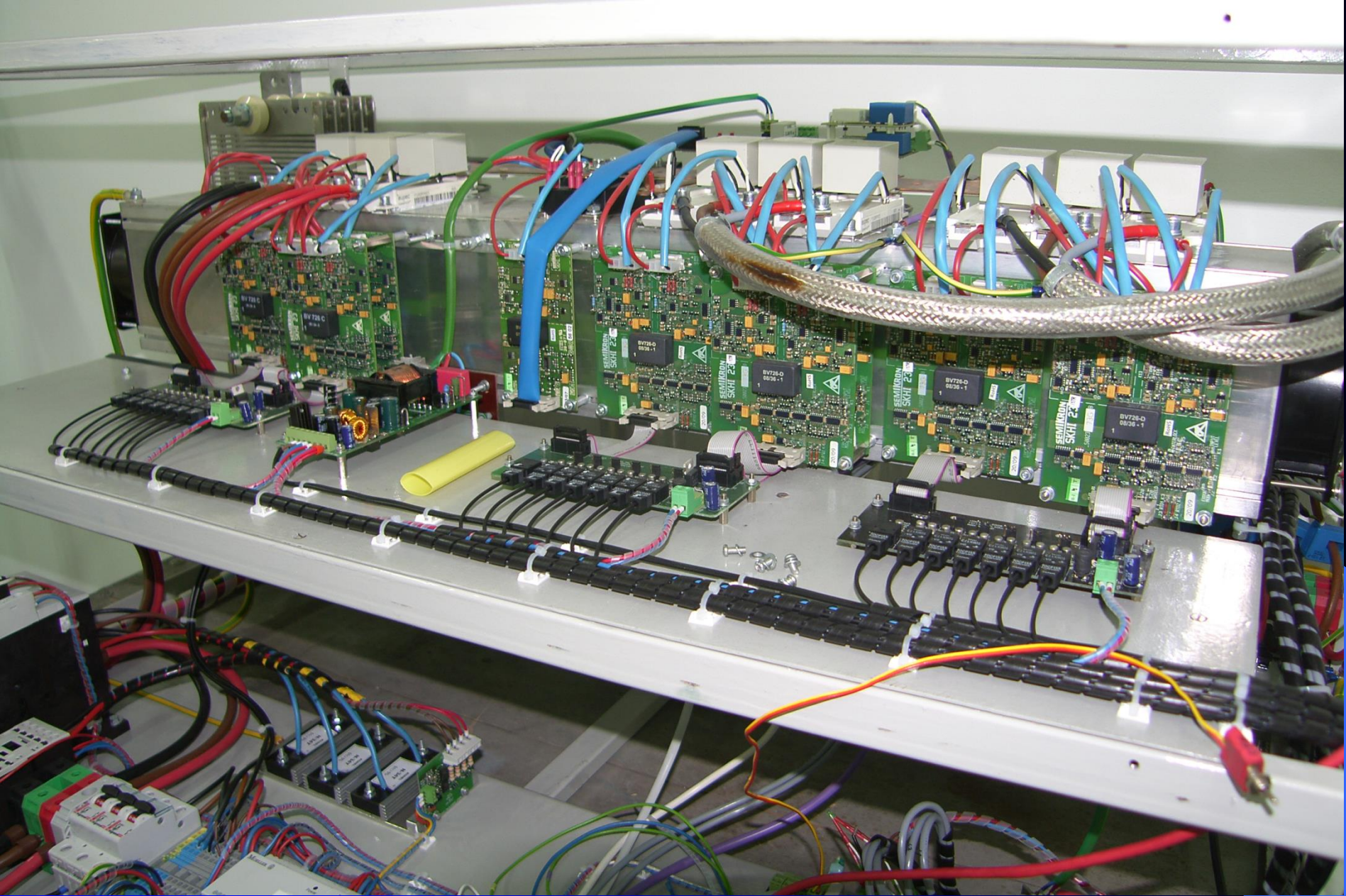
$$f_{U_{\max}} = 1333,3 \text{ Hz}$$





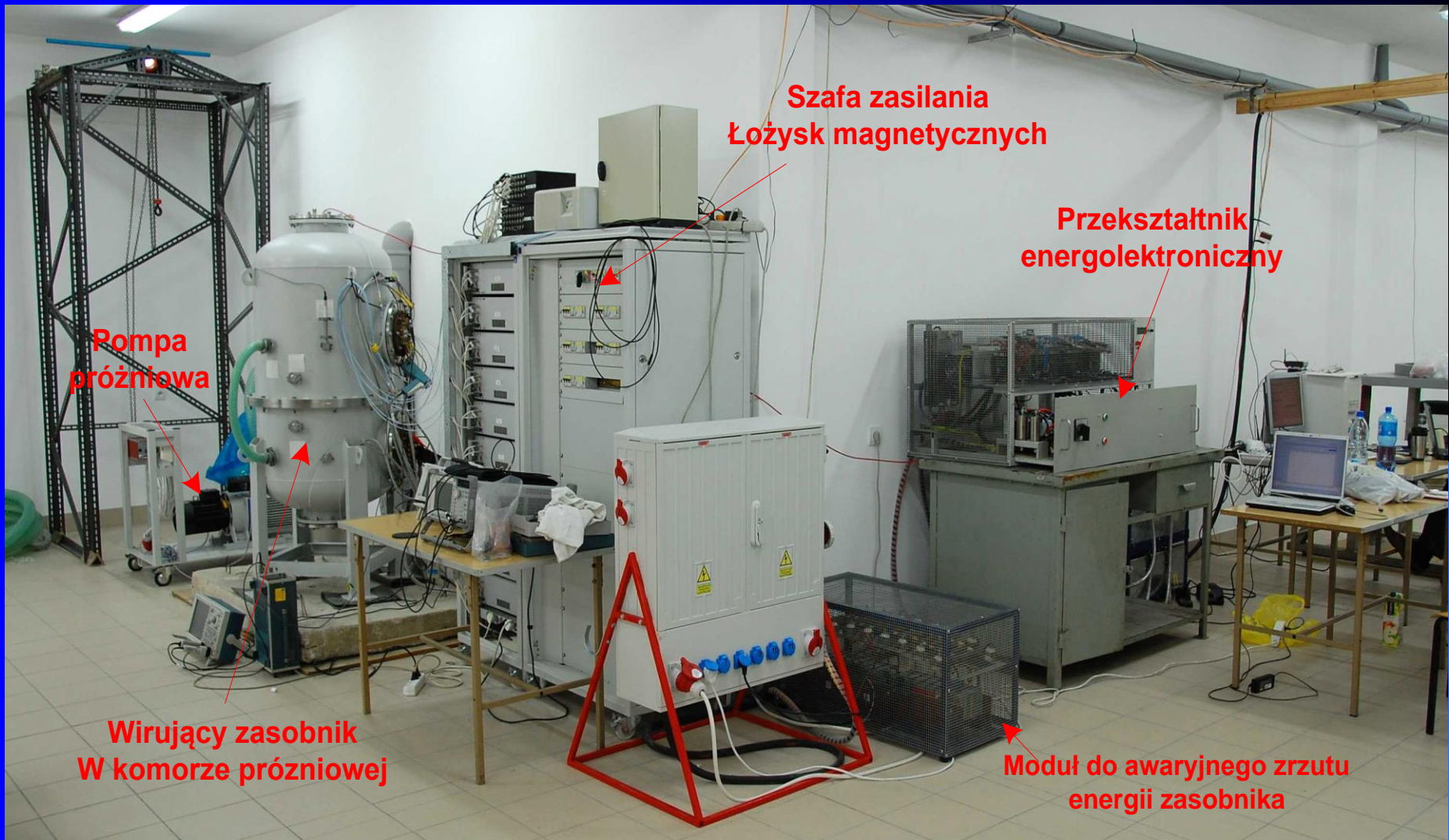












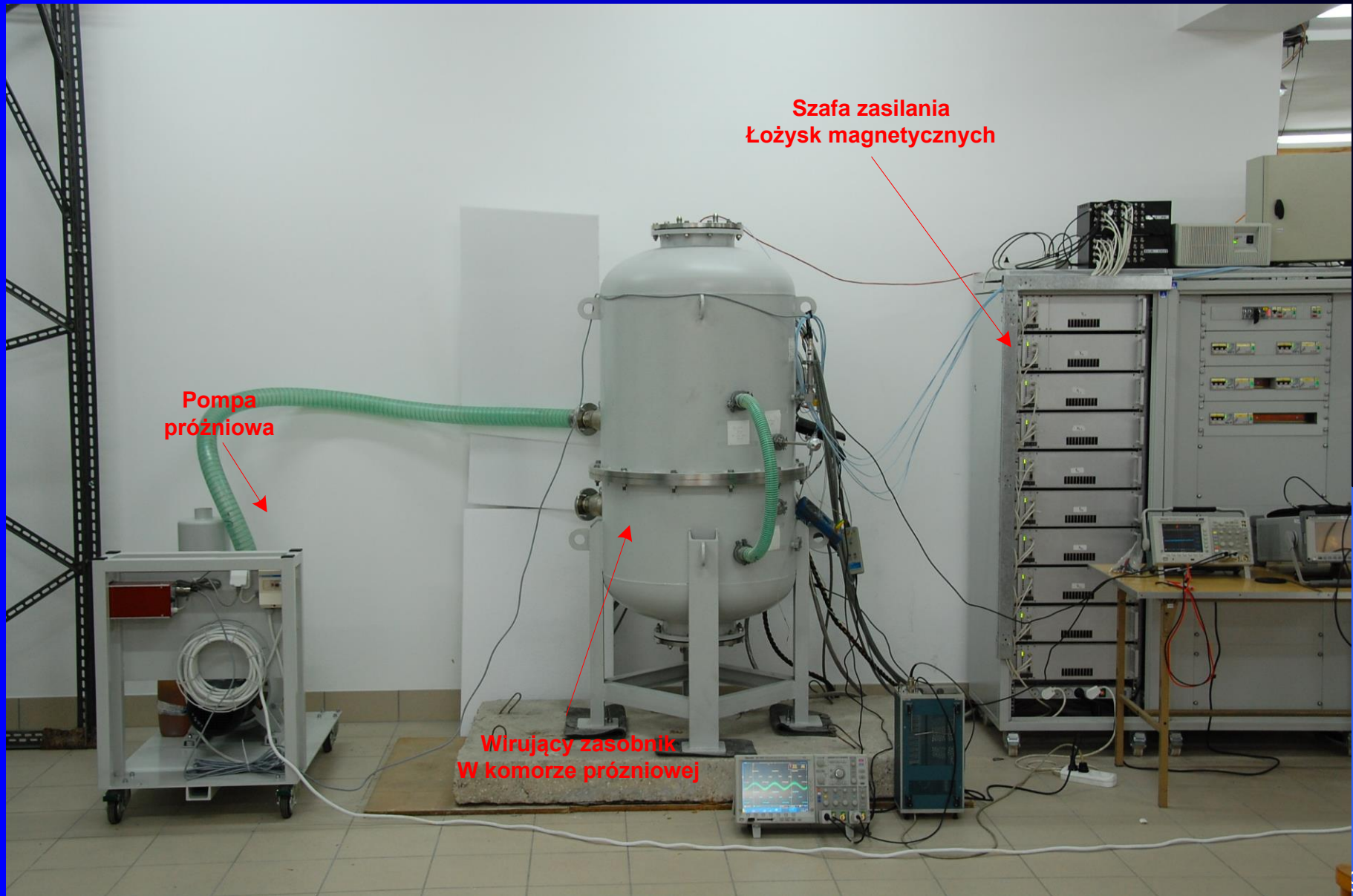
Pompa
próżniowa

Wirujący zasobnik
W komorze próżniowej

Szafa zasilania
Łożysk magnetycznych

Przekształtnik
energoelektroniczny

Moduł do awaryjnego zrzutu
energii zasobnika



Pompa próżniowa

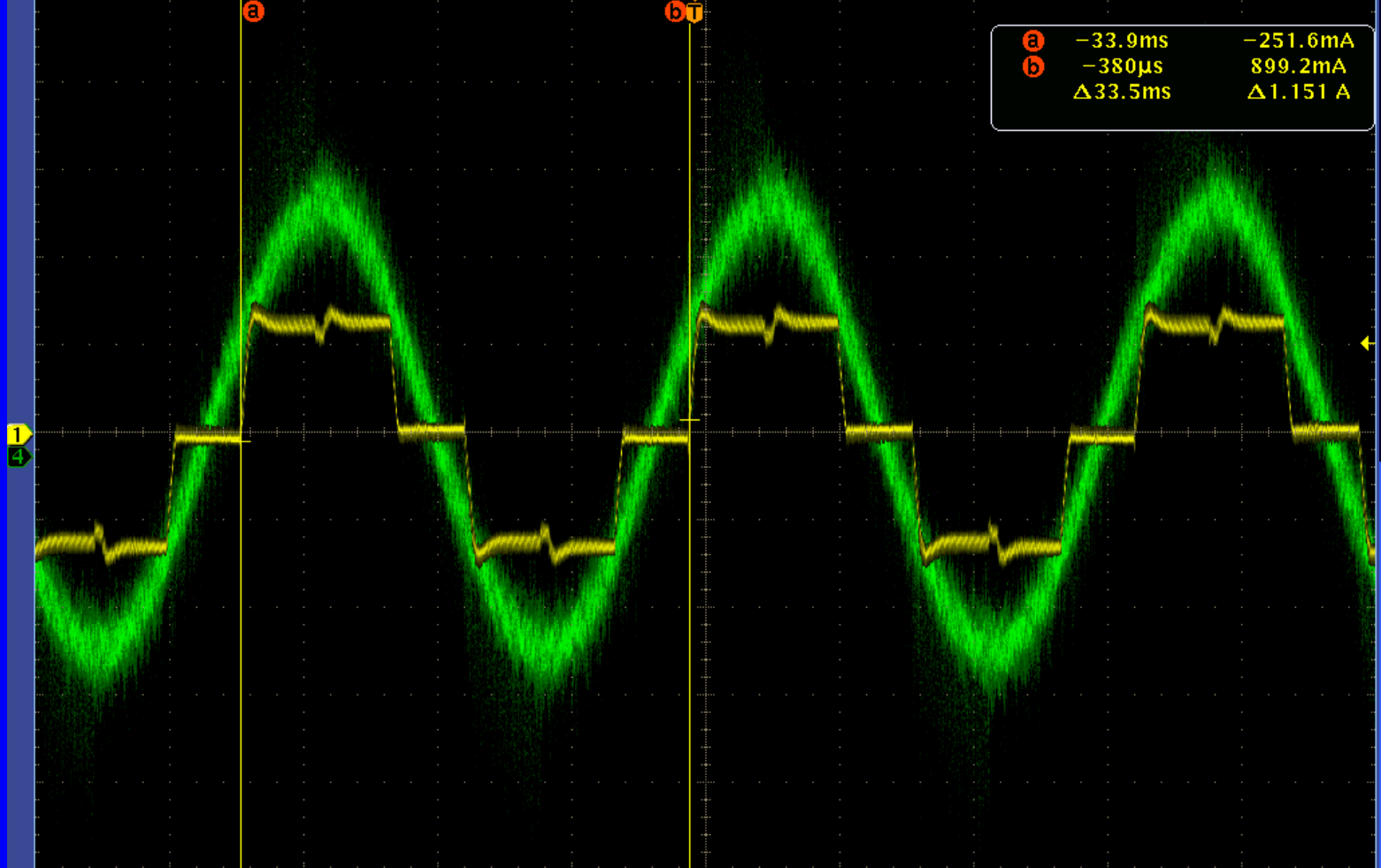
Szafa zasilania
Łożysk magnetycznych

Wirujący zasobnik
W komorze próżniowej

Tek Stop



Tek Stop



1
4

1 5.00 A

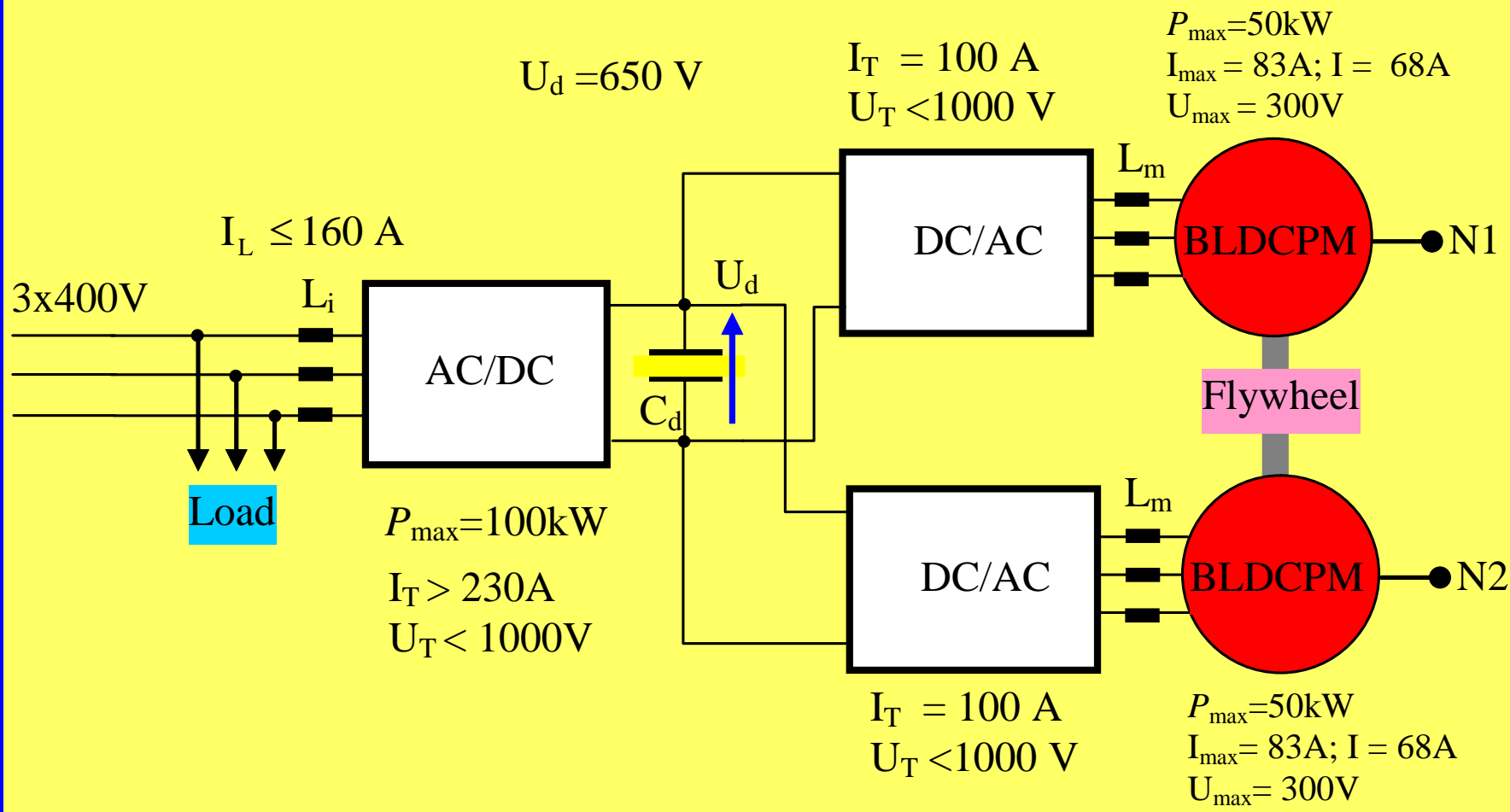
4 5.00 V

10.0ms
49.20 %

10.0MS/s
1M points

1 5.30 A

1 Jul 2010
19:07:17

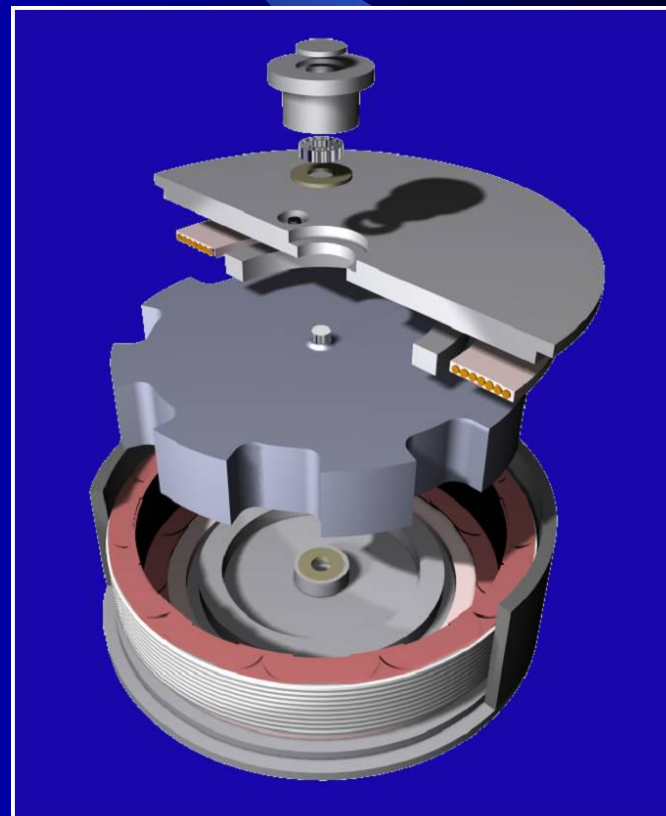
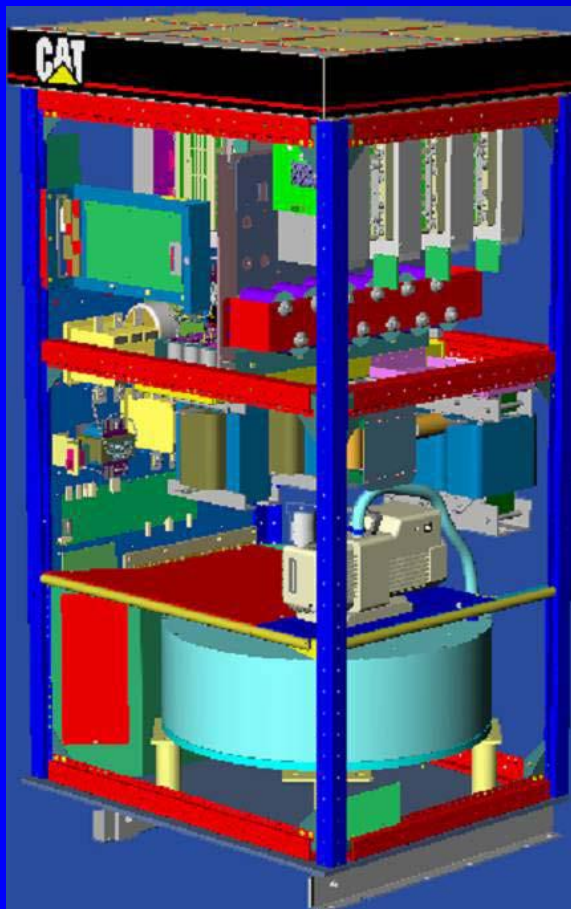


Realizatorzy projektu:

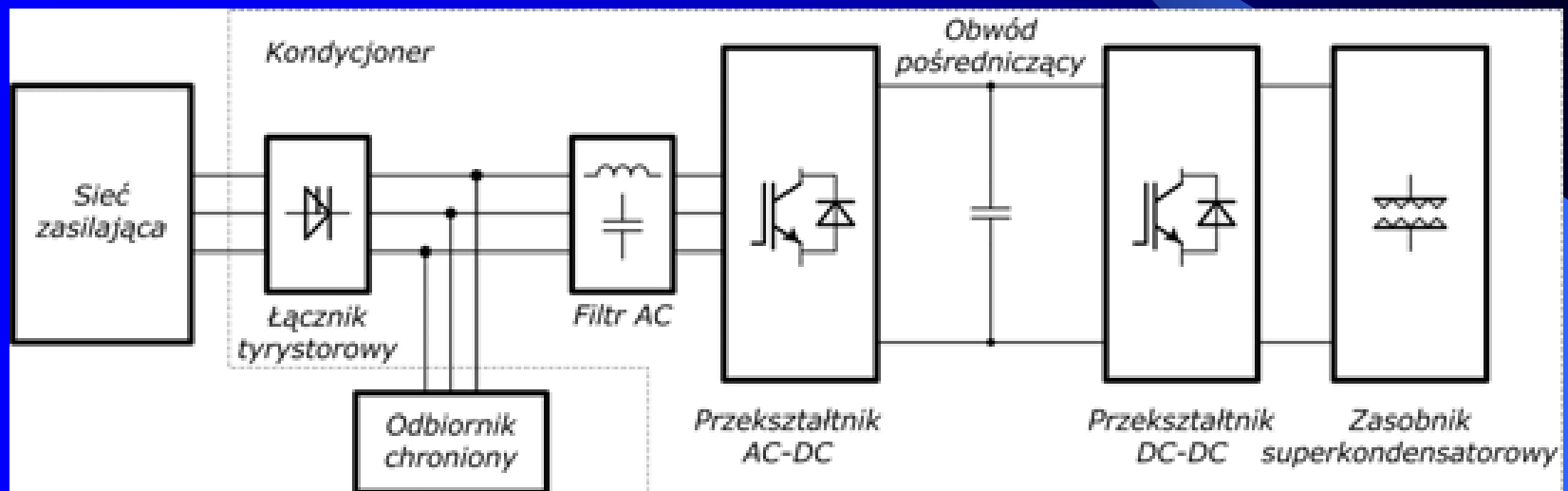
1. W zakresie energoelektroniki, napędu elektrycznego i automatyki urządzenia:
prof. dr hab. inż. Stanisław Piróg
Katedra Automatyki Napędu i Urządzeń Przemysłowych AGH Kraków,
2. W zakresie projektowania i konstrukcji łożysk magnetycznych:
prof. dr hab. inż. Zdzisław Gosiewski
Politechnika Białostocka,
3. W zakresie konstrukcji mechanicznej zasobnika i technologii materiałowych:
mgr inż. Artur Rowiński
Instytut Lotnictwa Warszawa,
4. W zakresie projektowania i konstrukcji maszyny elektrycznej:
prof. dr hab. inż. Grzegorz Kamiński
Zakład Maszyn Elektrycznych Politechniki Warszawskiej.

Kierownik projektu prof. dr hab.. inż. Stanisław Piróg

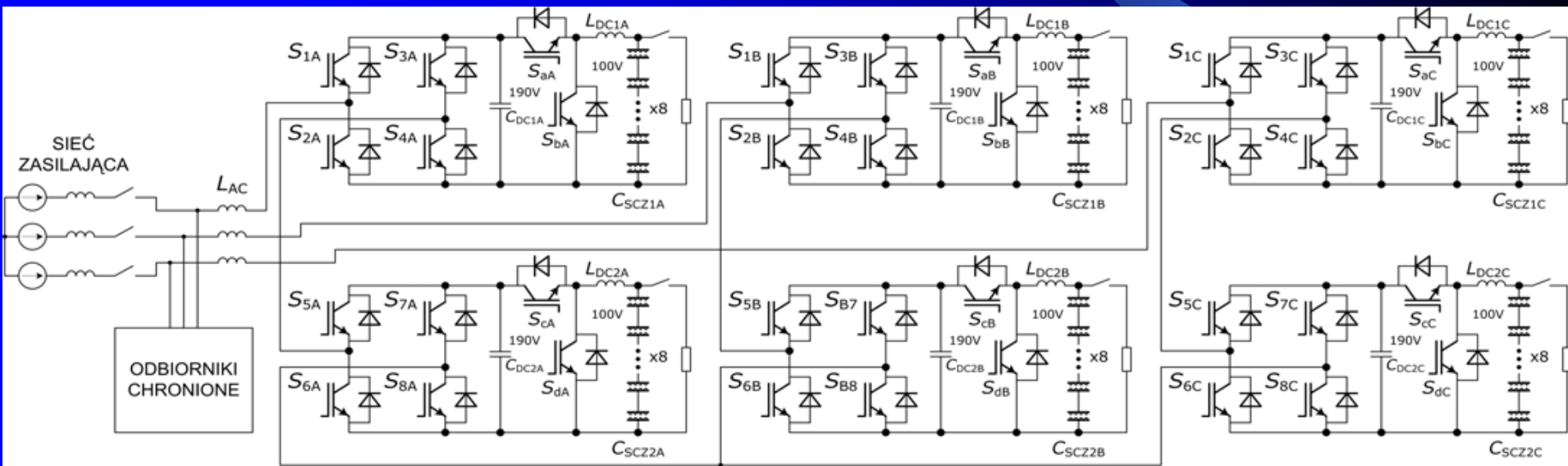
Przykład realizacji wirującego zasobnika energii



- Superkondensatorowy zasobnik energii



- Schemat obwodów głównych kondycjonera energii z 5-poziomowym przekształtnikiem kaskadowym i zasobnikiem superkondensatorowym





Dziękuję za uwagę

