RZECZPOSPOLITA POLSKA

Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej

(12) **OPIS PATENTOWY** (19) **PL** (11) **223804**

(13) **B1**

(21) Numer zgłoszenia: **397275**

(22) Data zgłoszenia: **08.12.2011**

(51) Int.Cl.
H02P 25/08 (2006.01)
H02P 6/18 (2006.01)

(54) **Sposób rozruchu przełączalnego silnika reluktancyjnego**

(43) Zgłoszenie ogłoszono:
10.06.2013 BUP 12/13

(45) O udzieleniu patentu ogłoszono:
30.11.2016 WUP 11/16

(73) Uprawniony z patentu:
AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE, Kraków, PL

(72) Twórca(y) wynalazku:
ALEKSANDER DZIADECKI, Kraków, PL
JANUSZ GRZEGORSKI, Kraków, PL
JÓZEF SKOTNICZNY, Kraków, PL

(74) Pełnomocnik:
rzecz. pat. Alina Magońska

PL 223804 B1

Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest sposób rozruchu przełączalnego silnika reluktancyjnego mający zastosowanie w elektrycznych urządzeniach napędowych.

Bezczujnikowe silniki reluktancyjne wykorzystują główne uzwojenia robocze do określenia położenia kątowego wirnika względem stojana. Dzięki temu nie ma konieczności stosowania enkoderów elektronicznych, takich jak czujniki hallotronowe, które z reguły wykazują mniejszą odporność na czynniki środowiskowe.

Z polskiego zgłoszenia patentowego Nr P.392873 znany jest sposób rozruchu i sterowania przełączalnego silnika reluktancyjnego posiadającego cztery pary biegunów stojana i trzy pary biegunów wirnika. Rozruch silnika rozpoczyna się od określenia startowej pozycji kątowej wirnika względem stojana. W tym celu główny blok kontroli za pośrednictwem bloku komutacyjnego oraz bloku pomiaru prądu i przełącznika dwutorowego dołącza się kolejno do uzwojeń stojana napięcie pomiarowe, którego polaryzacja zostaje zmieniona po przekroczeniu ustalonej granicznej wartości prądu. Tym sposobem zostają wyznaczone, za pośrednictwem bloku pomiaru czasu, spoczynkowe parametry czasowe impulsów prądowych dla każdego uzwojenia stojana. Następnie wybiera się uzwojenie, dla którego parametr czasowy impulsu prądowego przyjmuje najmniejszą wartość, po czym blok kontroli przełącza się w stan normalnej pracy. W tym celu, zgodnie z zamierzonym kierunkiem obrotów, blok kontroli za pośrednictwem bloku komutacyjnego załącza napięcie zasilania do wybranego uzwojenia względem uzwojenia, dla którego parametr czasowy impulsu prądowego był najmniejszy oraz załącza się za pośrednictwem bloku komutacyjnego, bloku pomiaru prądu i przełącznika dwutorowego napięcie pomiarowe do kolejnego uzwojenia stojana, w którym cyklicznie dokonuje się pomiaru indukcyjności poprzez pomiar czasu impulsu prądowego, z chwilą, gdy parametr czasowy impulsu prądowego przekroczy ustaloną wartość dla drugiego stałego parametru czasowego, blok kontroli za pośrednictwem bloku komutacyjnego dokonuje jednoczesnego przełączenia napięcia zasilania UZ i napięcia pomiarowego UP do kolejnych uzwojeń wybranych zgodnie z zamierzonym kierunkiem obrotów silnika reluktancyjnego.

Przedstawiony sposób wyznaczania położenia kątowego wirnika względem stojana nie zapewnia dostatecznej precyzji, co może doprowadzić do załączenia prądu roboczego do uzwojenia, którego nabiegunniki właśnie są ustawione naprzeciw nabiegunników rotora. W takiej sytuacji po załączeniu uzwojenia roboczego wirnik silnika zostanie utrzymany w pozycji spoczynkowej i rozruch silnika nie nastąpi. Sposób według wynalazku umożliwia bardziej precyzyjne rozdzielnie przedziałów w których winno nastąpić przełączenie uzwojeń.

Z japońskiego opisu patentowego JPH 10225174 znany jest system detekcji pozycji wirnika silnika bezszczotkowego, nie wymagający stosowania czujników zbliżeniowych. System wyznacza położenie wirnika względem stojana poprzez różniczkowanie wartości prądu płynącego przez uzwojenia stojana, porównanie ze sobą zmierzonych wartości pochodnych prądu, a także z dodatkową ustaloną wartością progową. W czasie fazy rozruchu system stosuje osobną procedury sterowania, w której następuje jednoczesne załączenie prądu do wszystkich uzwojeń silnika.

Istota sposobu rozruchu przełączanego silnika reluktancyjnego polega na tym, że zmierzone osobno dla każdej fazy wartości pochodnych prądu porównuje się z dwiema ustalonymi granicznymi wartościami dla pochodnych prądu, czyli z pierwszą graniczną wartością dla pochodnej prądu i drugą wartością graniczną dla pochodnej prądu, po czym, w oparciu o zebrane wyniki porównania zmierzonych wartości pochodnych prądów w uzwojeniach roboczych dokonuje się wyboru pierwszego uzwojenia, do którego załącza się prąd roboczy, natomiast kolejne przełączenia uzwojeń roboczych silnika dokonuje się w zależności od wybranego kierunku obrotu silnika oraz aktualnych wartości dla pochodnych prądów w uzwojeniach roboczych silnika w relacji do wyznaczonych wartości granicznych dla pochodnych prądu.

Ponadto, pierwszą graniczną wartość pochodnej prądu określa się na podstawie pomiaru szybkości narastania prądu przy ustalonej wartości napięcia zasilającego dla uzwojenia, którego nabiegunniki są maksymalnie zbliżone do nabiegunników rotora, następnie tak wyznaczoną wartość pochodnej prądu powiększa się o kilka procent i zapisuje w pamięci jako pierwszą graniczną wartość dla pochodnej prądu. Natomiast, drugą graniczną wartość pochodnej prąciu określa się na podstawie pomiaru szybkości narastania prądu przy ustalonej wartości napięcia zasilającego dla uzwojenia, którego nabiegunniki są maksymalnie oddalone od nabiegunników rotora, następnie tak wyznaczoną

wartość pochodnej prądu pomniejsza się o kilka procent i zapisuje w pamięci jako drugą graniczną wartość dla pochodnej prądu.

Przedmiot wynalazku w przykładzie wykonania uwidoczniono na rysunku, na którym Fig. 1 przedstawia blokowy schemat układu sterującego silnikiem reluktancyjnym, Fig. 2 przedstawia schemat połączeń w obwodzie zasilania uzwojeń fazowych silnika reluktancyjnego, Fig. 3 przedstawia zależności indukcyjności uzwojeń stojana w zależności od położenia kątowego wirnika.

W silniku reluktancyjnym wyposażonym w trzy pary biegunów stojana i dwie pary biegunów wirnika pochodną prądu każdego z uzwojeń można wyznaczyć z równania napięć:

$$\boldsymbol{U_z = i_f \cdot R_f + L_f(\theta)\frac{di_f}{dt} + i_f \cdot \omega\,\frac{dL_f(\theta)}{d\theta}}$$

Przy założeniu, że spadek na rezystancji uzwojenia wynikający z przepływu prądu pomiarowego jest pomijalnie mały w porównaniu ze spadkiem napięcia na reaktancji tego uzwojenia oraz faktu, że pomiar dotyczy nieruchomego wirnika, a więc napięcie rotacji jest równe zeru. Wówczas z równania napięciowego wartość pochodnej prądu można wyznaczyć następująco:

$$\frac{di_f}{dt} \approx \frac{U_z}{L_f(\theta)}$$

gdzie: di_f/dt jest wartością pochodnej prądu w uzwojeniu L_f w wyniku dołączenia do tego uzwojenia zasilającego napięcia fazowego U_z.

Przykład wykonania*

Dla przełączalnego silnika reluktancyjnego posiadającego trzy pary biegunów stojana i dwie pary biegunów wirnika wykonano pomiary zmian indukcyjności fazowych uzwojeń L_1, L_2, L_3 w funkcji kąta obrotu wirnika. Maksymalną wartość indukcyjności uzwojenia faz stojana silnika, występującą w położeniu, gdy oś wybranej diametralnie pary biegunów wirnika pokrywa się z osią wybranej diametralnie pary biegunów stojana, przyjęto równą 1,68 mH. Wartość tej indukcyjności zmniejszono do 1,56 mH. Na fig. 3 jest ona przedstawiona w postaci linii kropkowanej oznaczonej cyfrą „1”. Dla wyznaczonej indukcyjności obliczono wartość pochodnej prądu, przyjmując, że napięcie zasilające uzwojenia fazowe silnika ma wartość 100 V. Wartość obliczonej pochodnej prądu wynosi w przybliżeniu 64 A/ms i jako pierwsza graniczna wartość dla pochodnej prądu została zapamiętana w bloku pamięci pierwszej granicznej wartości dla pochodnej prądu 4. Minimalną wartość indukcyjności uzwojenia faz stojana silnika, występującą w położeniu, gdy dwie sąsiednie pary biegunów wirnika są równoodległe kątowo od osi mierzonej pary biegunów stojana, przyjęto równą 0,37 mH. Wartość tej indukcyjności zwiększono do 0,46 mH. Na fig. 3 jest ona przedstawiona w postaci linii kropkowanej oznaczonej cyfrą „2”. Dla wyznaczonej indukcyjności obliczono wartość pochodnej prądu, przyjmując, że napięcie zasilające uzwojenia fazowe silnika ma wartość 100 V. Wartość obliczonej pochodnej prądu wynosi w zaokrągleniu 220 A/ms i jako druga wartość graniczna dla pochodnej prądu została zapamiętana w bloku pamięci drugiej granicznej wartości dla pochodnej prądu 5.

W następnej kolejności sprawdzono, czy ustalone wartości dla pierwszej granicznej i drugiej granicznej pochodnej prądu gwarantują spełnienie warunku dotyczącego występowania położeń wirnika względem stojana dla których indukcyjność jednego uzwojenia stojana ogranicza wartość pochodnej, badanego w tym uzwojeniu prądu, do poziomu mniejszego od pierwszej granicznej wartości dla pochodnej prądu, a indukcyjność drugiego uzwojenia stojana ogranicza wartość pochodnej, badanego w tym uzwojeniu prądu, do poziomu większego od drugiej granicznej wartości dla pochodnej prądu. Dla przebiegów zmian indukcyjności własnych trzech uzwojeń stojana silnika w funkcji kątowego położenia wirnika względem stojana przedstawionych na fig. 3. Warunek ten jest spełniony dla tych położeń kątowych wirnika w których wykres zmian indukcyjności fazowej jednego uzwojenia przebiega powyżej linii kropkowanej oznaczonej cyfrą „1”, a drugiego poniżej linii kropkowanej oznaczonej cyfrą „2”. Występuje więc przykładowo między kątami 38 i 41 stopni, 56 i 58 stopni itd.

Przed każdym rozruchem dokonuje się pomiaru wartości pochodnej prądu załączanego do dowolnie wybranego uzwojenia stojana silnika reluktancyjnego. Na podstawie porównania otrzymanej wartości pochodnej prądu z pierwszą graniczną wartością dla pochodnej prądu i drugą graniczną wartością dla pochodnej prądu załącza się prąd roboczy do wskazanego uzwojenia lub dokonuje kolejnego pomiaru wartości pochodnej prądu w następnym uzwojeniu. Jeśli przykładowo dla silnika, reluktancyjnego posiadającego trzy pary biegunów stojana i dwie pary biegunów wirnika, którego zależności zmian indukcyjności uzwojeń stojana w zależności od położenia kątowego wirnika pokazano na fig. 3,

kierunek obrotów silnika przyjęto zgodnie z sekwencją załączanych faz roboczych L_1, L_2, L_3 i założono, że fazą w której dokonuje się pierwszego pomiaru wartości pochodnej prądu jest faza L_1, to w zakresie położenia kątowego wirnika względem stojana pomiędzy liniami kropkowanymi:

- „a” i „b” – pochodna prądu w fazie L_1 jest większa od pierwszej granicznej wartości dla pochodnej prądu i jednocześnie mniejsza od drugiej granicznej wartości dla pochodnej prądu, a więc następuje pomiar pochodnej prądu w kolejnym, w przyjętej sekwencji wirowania, uzwojeniu fazy L_2. Pochodna prądu w tej fazie jest większa od drugiej granicznej wartości dla pochodnej prądu, więc zgodnie z podaną regułą prąd roboczy zostaje włączony do uzwojenia poprzedniej, w przyjętej sekwencji wirowania, fazy L_1.
- „b” i „c” – pochodna prądu w fazie L_1 jest mniejsza od pierwszej granicznej wartości dla pochodnej prądu, a więc zgodnie z podaną regułą prąd roboczy zostaje włączony do uzwojenia następnej, w przyjętej sekwencji wirowania, fazy L_2.
- „c i „d” – pochodna prądu w fazie L_1 jest większa od pierwszej granicznej wartości dla pochodnej prądu i jednocześnie mniejsza od drugiej granicznej wartości dla pochodnej prądu, a więc następuje pomiar pochodnej prądu w kolejnym, w przyjętej sekwencji wirowania, uzwojeniu fazy L_2. Pochodna prądu w tej fazie jest również większa od pierwszej granicznej wartości dla pochodnej prądu i jednocześnie mniejsza od drugiej granicznej wartości dla pochodnej prądu, a więc następuje pomiar pochodnej prądu w kolejnym, w przyjętej sekwencji wirowania, uzwojeniu fazy L_3. Pochodna prądu w tej fazie jest większa od drugiego parametru pochodnej prądu, więc zgodnie z podaną regułą prąd roboczy zostaje włączony do uzwojenia poprzedniej, w przyjętej sekwencji wirowania, fazy L_2.
- „d” i „e” – pochodna prąciu w fazie L_1 jest większa od pierwszej granicznej wartości dla pochodnej prądu i jednocześnie mniejsza od drugiej granicznej wartości dla pochodnej prądu, a więc następuje pomiar pochodnej prądu w kolejnym, w przyjętej sekwencji wirowania, uzwojeniu fazy L_2. Pochodna prądu w tej fazie jest mniejsza od pierwszej granicznej wartości dla pochodnej prądu, więc zgodnie z podaną regułą prąd roboczy zostaje włączony do uzwojenia następnej, w przyjętej sekwencji wirowania, fazy L_3.
- „e” i „f” – pochodna prądu w fazie L_1 jest większa od drugiej granicznej wartości dla pochodnej prądu, a więc zgodnie z podaną regułą prąd roboczy zostaje włączony do uzwojenia poprzedniej, w przyjętej sekwencji wirowania, fazy L_3.
- „f” i „g” – pochodna prądu w fazie L_1 jest większa od pierwszej granicznej wartości dla pochodnej prądu i jednocześnie mniejsza od drugiej granicznej wartości dla pochodnej prądu, a więc następuje pomiar pochodnej prądu w kolejnym, w przyjętej sekwencji wirowania, uzwojeniu fazy L_2. Pochodna prądu w tej fazie jest również większa od pierwszej granicznej wartości dla pochodnej prądu i jednocześnie mniejsza od drugiej granicznej wartości dla pochodnej prądu, a więc następuje pomiar pochodnej prądu w kolejnym, w przyjętej sekwencji wirowania, uzwojeniu fazy L_3. Pochodna prądu w tej fazie jest mniejsza od pierwszej granicznej wartości dla pochodnej prądu, więc zgodnie z podaną regułą prąd roboczy zostaje włączony do uzwojenia następnej, w przyjętej sekwencji wirowania, fazy L_1.

Ponieważ w każdym z opisanych przypadków załączenie prądu roboczego następuje do tego uzwojenia fazowego, w którym następuje wzrost indukcyjności wraz z obrotem wirnika w zamierzonym kierunku wirowania, wytwarzany jest więc przez silnik moment obrotowy w tym właśnie kierunku. Opisany sposób pozwala w ciągu kilkudziesięciu mikrosekund wskazać uzwojenie fazowe, do którego należy włączyć prąd roboczy, aby uzyskać obrót wirnika w zamierzonym kierunku.

Zastrzeżenia patentowe

1. Sposób rozruchu przełączalnego silnika reluktancyjnego posiadającego, co najmniej trzy pary biegunów stojana, w którym jednorazowo wyznacza się zależności wartości indukcyjności uzwojeń roboczych silnika od położenia kątowego wirnika względem stojana, następnie w oparciu zmierzone wartości pochodnych prądu ustala się aktualne położenie wirnika względem stojana, **znamienny tym**, że zmierzone osobno dla każdej fazy wartości pochodnych prądu porównuje się z dwiema ustalonymi granicznymi wartościami dla pochodnych prądu, czyli z pierwszą graniczną wartością dla pochodnej prądu i drugą wartością graniczną dla pochodnej prądu, po czym, w oparciu o zebrane wyniki porównania zmierzonych wartości pochodnych prądów w uzwojeniach roboczych dokonuje się wyboru

pierwszego uzwojenia, do którego załącza się prąd roboczy, natomiast kolejne przełączenia uzwojeń roboczych silnika dokonuje się w zależności od wybranego kierunku obrotu silnika oraz aktualnych wartości dla pochodnych prądów w uzwojeniach roboczych silnika w relacji do wyznaczonych wartości granicznych dla pochodnych prądu.

2. Sposób rozruchu według zastrz. 1, **znamienny tym**, że pierwszą graniczną wartość dla pochodnej prądu określa się na podstawie pomiaru szybkości narastania prądu przy ustalonej wartości napięcia zasilającego dla uzwojenia, którego nabiegunniki są maksymalnie zbliżone do nabiegunników rotora, następnie tak wyznaczoną wartość pochodnej prądu powiększa się o kilka procent i zapisuje w pamięci jako pierwszą graniczną wartość dla pochodnej prądu.

3. Sposób rozruchu według zastrz. 1, **znamienny tym**, że drugą graniczną wartość dla pochodnej prąciu określa się na podstawie pomiaru szybkości narastania prądu przy ustalonej wartości napięcia zasilającego dla uzwojenia, którego nabiegunniki są maksymalnie oddalone od nabiegunników rotora, następnie tak wyznaczoną wartość pochodnej prądu pomniejsza się o kilka procent i zapisuje w pamięci jako drugą graniczną wartość dla pochodnej prądu.

Rysunki

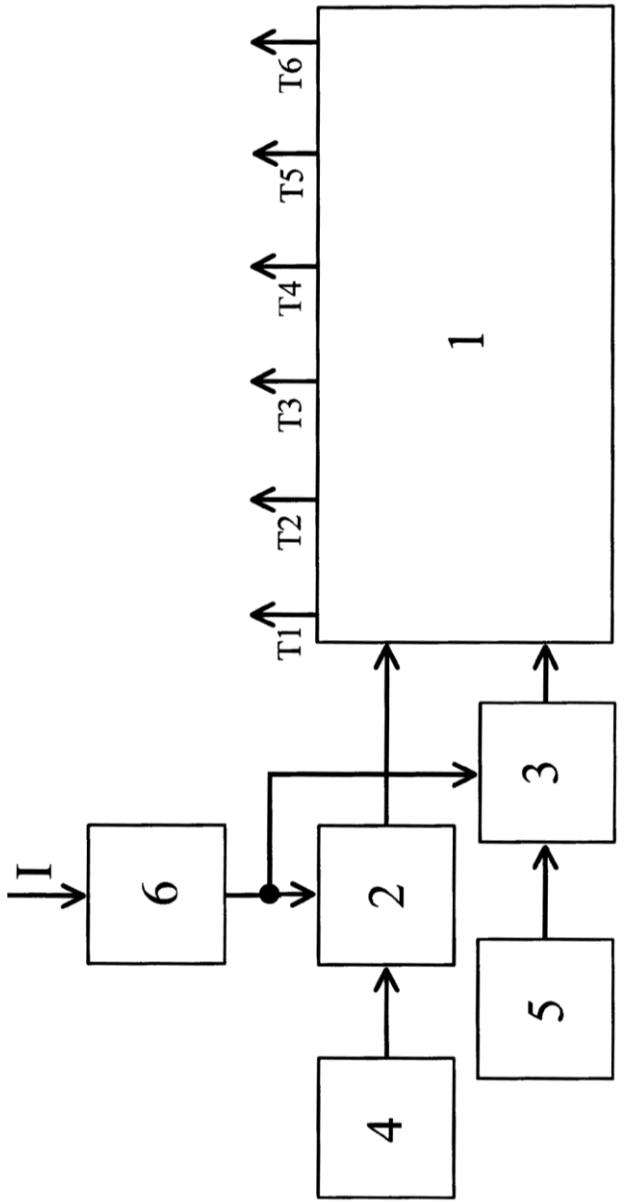

Fig. 1

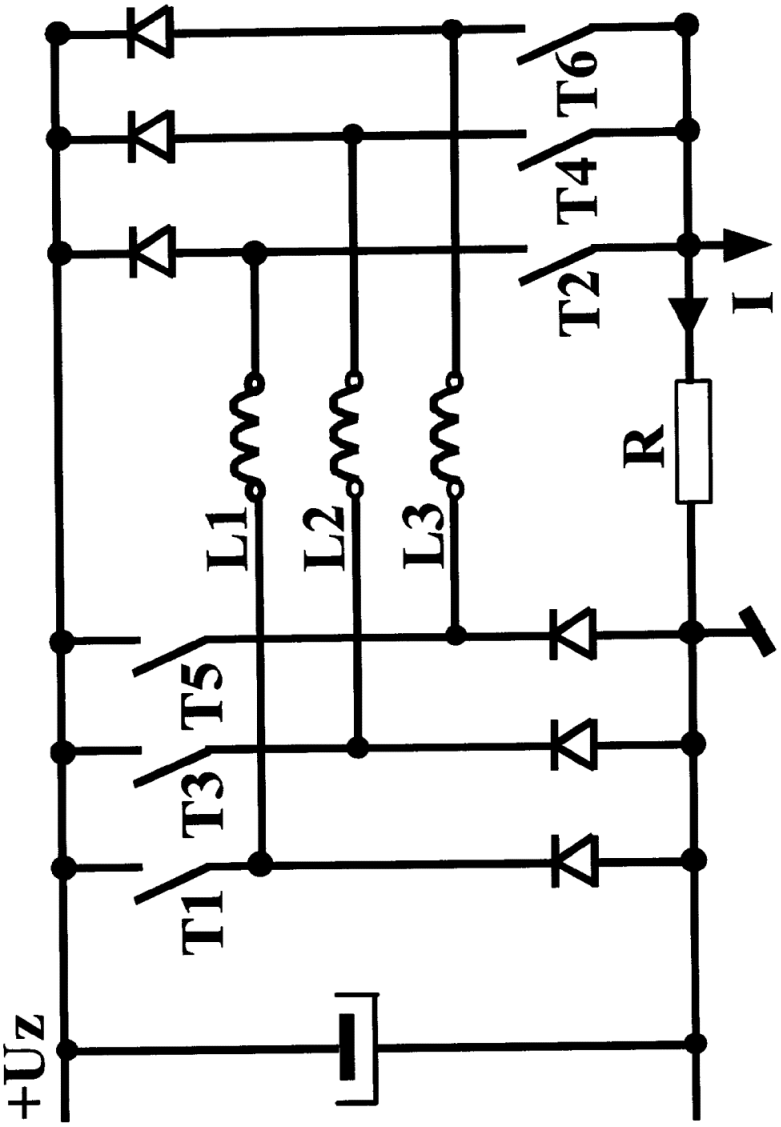

Fig. 2

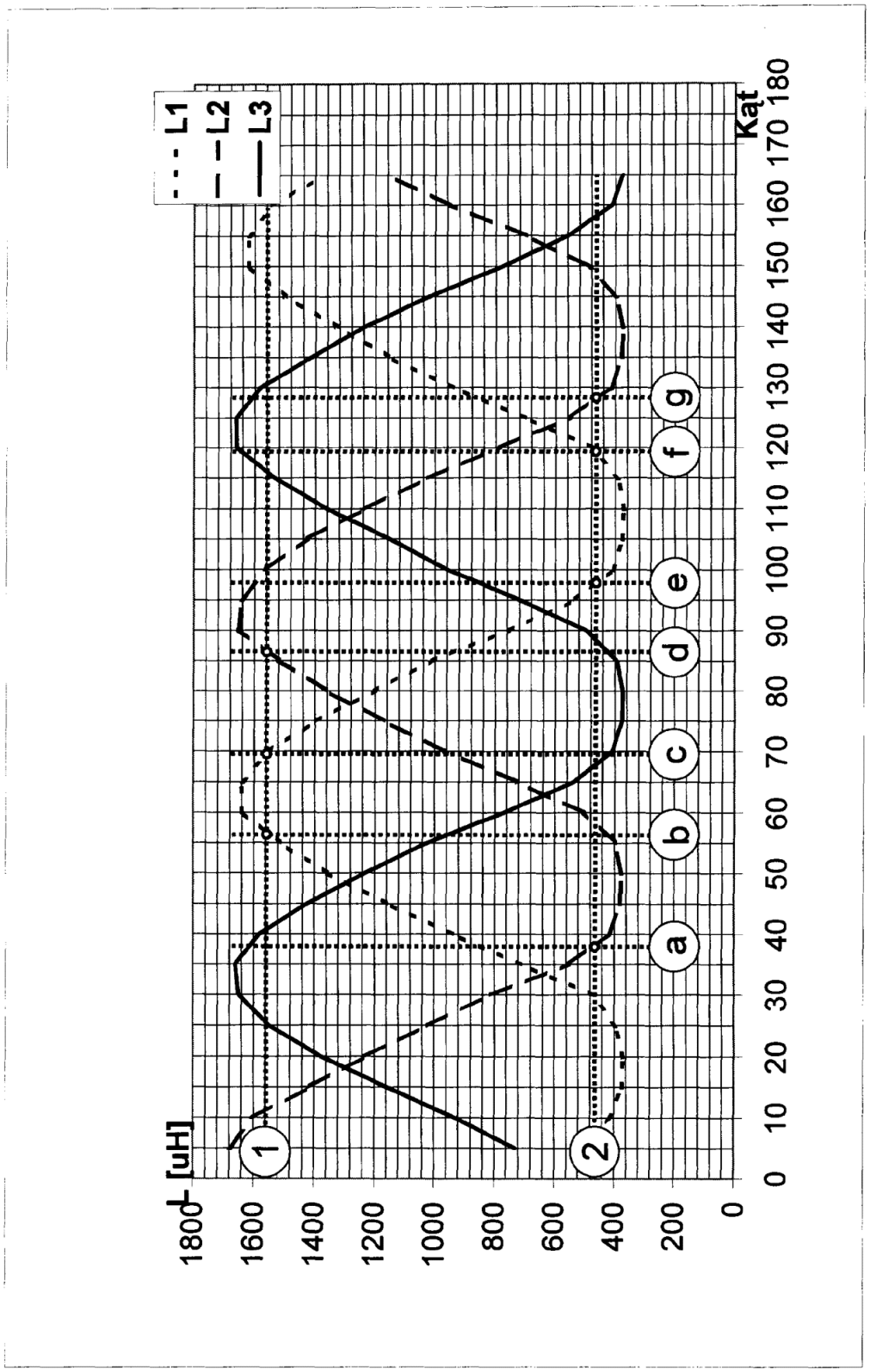
L1
L2
L3
L [uH]
1800
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130 140 150 160 170 180
Kąt
1
2
a
b
c
d
e
f
g

Fig. 3

Departament Wydawnictw UPRP
Cena 2,46 zł (w tym 23% VAT)