

**Jakub Bernatt, Stanisław Gawron, Tadeusz Glinka**  
Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice

## PRĄDNICA WZBUDZANA MAGNESAMI TRWAŁYMI Z PRZEŁĄCZNIKIEM ZACZEPÓW

### PERMANENT MAGNET GENERATOR WITH TAP CHANGER

**Streszczenie:** Artykuł dotyczy prądnic synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi, które pracują przy znamionowej prędkości obrotowej. Regulacja napięcia prądnicy jest realizowana na zaczepekach uzwojenia twornika. Przełączniki zaczepek są takie jak w transformatorach. Rozpatrzono kilka wariantów rozwiązania regulacji napięcia poprzez zmianę zaczepek. Są to rozwiązania które można stosować, do przełączania zaczepek uzwojenia, na postoju prądnicy i w czasie pracy prądnicy. Przedstawiono także rozwiązanie połączenia prądnicy z transformatorem trójuzwojeniowym i regulacją napięcia na zaczepekach uzwojeniu transformatora.

**Abstract:** This article applies to synchronous generators excited by permanent magnets, which operate at rated rotational speed. The generator voltage is regulated on the armature winding hooks. The tap-changers are the same as in transformers. Several variants of voltage regulation solutions by changing taps were considered. These are solutions that can be used to switch the winding taps, when the generator is stopped and during generator operation. The solution of connecting the generator with a three-winding transformer and voltage regulation on transformer winding taps was also presented.

**Słowa kluczowe:** prądnica synchroniczna, magnesy trwałe, regulacja napięcia, przełączniki zaczepek  
**Keyword:** synchronous generator, permanent magnets, voltage regulation, tap changer

### 1. Wstęp

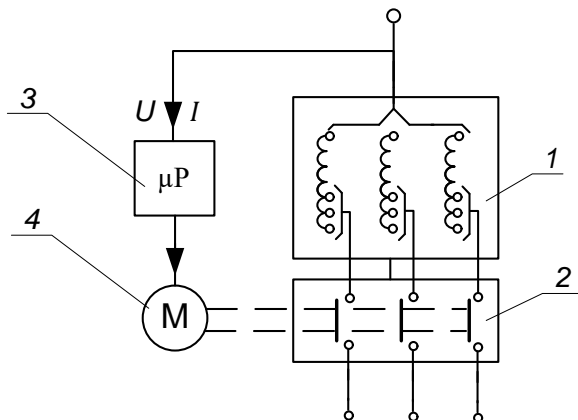
Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi mają strumień wzbudzenia o wartości stałej. Maszyny te stosowane jako prądnice, w standardowym wykonaniu charakteryzują się dużą zmiennością napięcia. Prądnic pracujących przy stałej (znamionowej) prędkości obrotowej nie można bezpośrednio synchronizować z siecią elektroenergetyczną gdyż nie mają możliwości regulacji napięcia. Dlatego stosowane są maszyny ze wzbudzeniem hybrydowym, to jest połączonym wzbudzeniem magnesami trwałymi i wzbudzeniem elektromagnetycznym. Znane są rozwiązania prądnic ze wzbudzeniem hybrydowym szeregowym, równoległym i szeregowo równoległym. Wzbudzenie hybrydowe w standardowym wykonaniu ma wirujące uzwojenie wzbudzenia, a więc wirnik ma pierścienie ślizgowe na które jest to uzwojenie wyprowadzone i szczotki. Z tego powodu jest to rozwiązanie mało korzystne, szczególnie dla elektrowni wiatrowych i elektrowni wodnych. Są także rozwiązania maszyn ze wzbudzeniem hybrydowym i nieruchomym

uzwojeniem wzbudzenia. Maszyny te charakteryzują się złożoną budową i większym gabarytem. Znane jest także z patentu: EP 1 107 426 A2 [4] rozwiązanie prądnicy prądu zmiennego w którym uzwojenia stojana jest złożone z grupy cewek z końcówkami wyprowadzonymi na zaciski. Na tych zaciskach cewki są odpowiednio łączone szeregowo i równolegle. Takie rozwiązanie połączenia cewek uzwojenia z obwodem wyjściowym jest realizowane w czasie postoju prądnicy. To rozwiązanie jest realizowane w stanie bezprądowym, nie może być zatem wykorzystane do bieżącej regulacji napięcia w czasie pracy prądnicy. Najczęściej stosowanym rozwiązaniem jest połączenie prądnicy z falownikiem AC/DC/AC. Falownik przekształca napięcie prądnicy na napięcie i częstotliwość sieci elektroenergetycznej. Elektrownia wiatrowa bądź elektrownia wodna może być włączona poprzez falownik do sieci elektroenergetycznej. Falownik zwiększa koszt budowy elektrowni. Rozwiązanie to jest stosowane tylko w elektrowniach małej i średniej mocy o napięciu

prądnicy nie przekraczającym 1 000 V. Falowniki na wyższe napięcia są znane lecz drogie i ich stosowanie w elektrowniach wiatrowych i elektrowniach wodnych nie jest ekonomicznie uzasadnione. Wadą falownika jest także generacja do sieci harmonicznych prądu. W dalszym ciągu poszukuje się prostych i stosunkowo tanich rozwiązań układów regulacji napięcia prądnic wzbudzonych magnesami trwałymi [1].

## 2. Regulacja napięcia prądnicy przełącznikiem zacze- pów

Prądnica synchroniczna wzbudzana magnesami trwałymi jest trójfazowa. Uzwojenie twornika wszystkich faz ma zacze- py, które są wyprowadzone na przełącznik zacze- pów. Pozycję ustawienia przełącznika zacze- pu realizuje układ serwomechaniczny M. Pozycja ta jest wybierana przez sterownik mikropro- cesorowy  $\mu P$ , który mierzy parametry pracy prądnicy: napięcie, prąd,  $\cos\varphi$ , częstotli- wość i przekazuje do układu serwomecha- nicznego M polecenie przełączenia zacze- pu na żadaną pozycję. Schemat blokowy ukła- du przedstawia rys. 1. Przełączniki zacze- pów są identyczne jak w transformatorach.



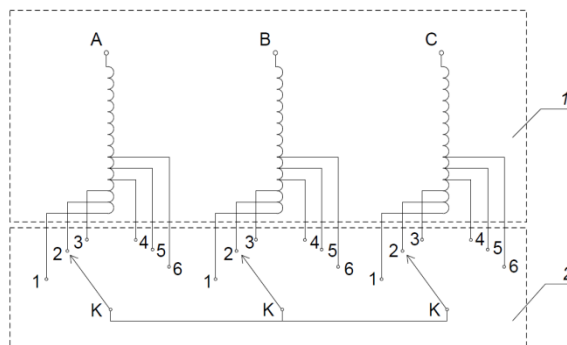
Rys. 1. Schemat blokowy zacze- powego układu regulacji napięcia prądnicy wzbudzonej magnesami trwałymi: 1 – uzwojenie twornika z zacze- pami, 2 – przełącznik zacze- pów, 3 – sterownik mikroprocesorowy, 4 – serwomechaniczny układ napędowy

W transformatorach stosowanych jest kilka rodzajów przełączników zacze- pów [3]. Wykorzystując te same przełączniki zacze- pów w prądnicach należy końcówki zacze- pów

uzwojenia twornika dopasować do kon- strukcji wybranego przełącznika zacze- pów. Ogólnie przełączniki zacze- pów można po- dzielić na:

- jednostopniowe proste,
- jednostopniowe podobciążeniowe,
- dwustopniowe szeregowo,
- krzyżowe dwustopniowe szeregowo.

Rozwiązanie połączenia zacze- pów uzwoje- nia z przełącznikiem jednostopniowym jest przedstawione na rys. 2.

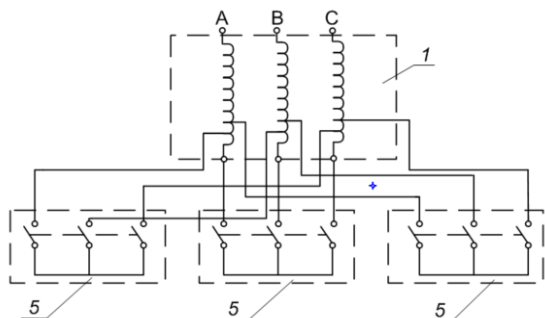


Rys. 2. Schemat połączenia zacze- pów uzwojenia z przełącznikiem jednostopniowym: 1 – uzwoje- nie twornika, 2 – przełącznik zacze- pów

Przełączanie zacze- pów można realizować w stanie bezprądowym i w czasie postoiu prądnicy. Przełączenie zacze- pów w czasie pracy prądnicy spowoduje powstanie łuku elektrycznego między zaciskami przełącza- nymi, który opala styki przełącznika i po- woduje przejściowe zwarcie zwojowe mię- dzy zacze- pami uzwojenia prądnicy. W krót- kim czasie doprowadzi to do awarii prąd- nicy i awarii przełącznika zacze- pów.

Zacze- py uzwojenia można także zwierać wyłącznikami. Korzystnie jest jeśli uzwoje- nie prądnicy 1 jest połączone w gwiazdę, a punkt łączenia gwiazdy jest na zacze- pach. W tym rozwiązaniu wyłączniki pełnią funk- cję przełącznika zacze- pów. Na rysunku 3 przedstawiono schemat uzwojenia z trzema zacze- pami przełączanymi wyłącznikami. Wyłączniki muszą być wzajemnie bloko- wane, to znaczy gdy jeden z nich jest załą- czony to dwa pozostałe wyłączniki muszą być otwarte. Załączenie kolejnego wyłąc- nika musi być poprzedzone wyłączeniem wyłącznika który był załączony. Jeśli te wa- runki są spełnione to przełączanie zacze- pów

uzwojenia można realizować w czasie pracy prądnicy.

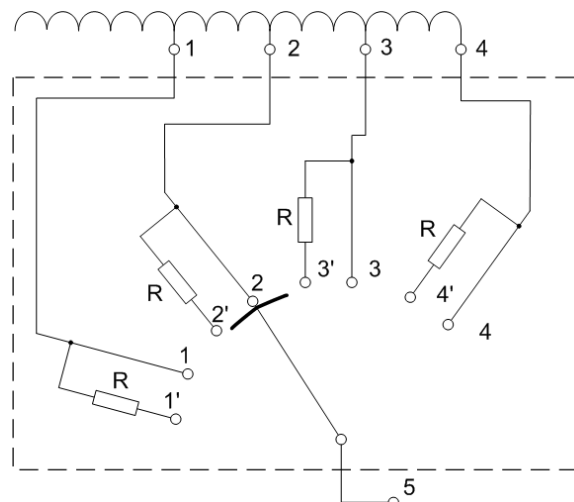


Rys. 3. Schemat połączenia zacsepów uzwojenia z wyłącznikami: 1 – uzwojenie twornika, 5 - wyłączniki

Jednak w czasie pracy prądnicy wyłączenie wyłącznika przerywa przepływ prądu. Przerwanie prądu generuje napięcia w uzwojeniu narażając izolację na przebicie. W prądnicach włączonych do sieci elektroenergetycznej, w czasie przełączania wyłączników, prądnica może utracić synchronizację. Załączenie prądnicy niezynchronizowanej generuje duży moment udarowy, który może uszkodzić układ napędowy. Alternatywnym rozwiązaniem jest przełącznik zacsepów jednostopniowy podobciążeniowy. Przełącznik taki jest rozwiązaniem standardowym stosowanym w transformatorach stacyjnych. Przełącznik ten charakteryzuje się tym, że przejście suwaka stykowego z jednej pozycji na drugą odbywa się z włączeniem rezystora  $R$ . Na rysunku 4 pokazano schemat podobciążonego przełącznika zacsepów. Rysunek 4 ilustruje budowę przełącznika i ułatwia zrozumienie jego działania. Stałe pozycje ruchomego styku suwaka to: 1, 2, 3 i 4. Pozycje przejściowe to: 1', 2', 3' i 4'. Styk ruchomy suwaka ma kształt łuku o długości tak dobranej aby w czasie przełączania zwiarał dwa sąsiednie zaciski przełącznika. Zmiana zacsepów suwaka np. z pozycji 2 na pozycję 3 odbywa się w trzech etapach:

- suwak zwiara styki 2 i 3', co powoduje zwarcie zacsepów uzwojenia 2 i 3 przez rezystancję  $R$ ,

- suwak zwiara pozycje 3' i 3, co powoduje rozwarcie zacsepów uzwojenia i pracę równoległą zacisków 3' i 3 przełącznika,  
- pozycja 3 jest końcowym położeniem suwaka.

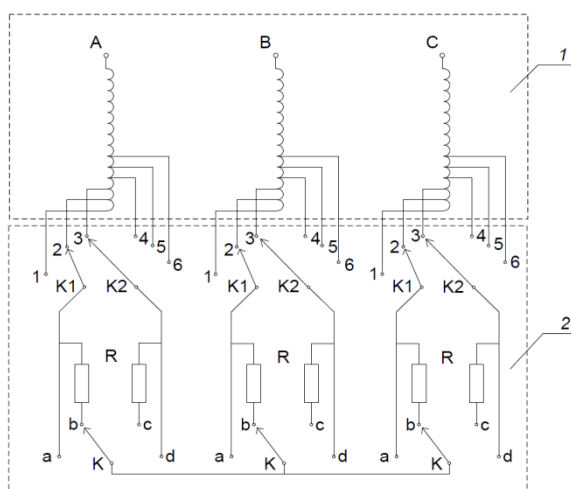


Rys. 4. Schemat podobciążeniowego jednostopniowego przełącznika zacsepów jednej fazy

Przeskok suwaka przez zacisk pośredniczący 3' odbywa się bardzo szybko, jest to czas kilku ms, zapewnia to sprężyna w układzie mechanicznym serwomechanizmu przełączającego suwak. Krótki czas przełączenia powoduje, że ilość ciepła wydzielanego na rezystancji  $R$  jest mała i rezystory  $R$  gabarytowo są niewielkie.

Przełącznik zacsepów podobciążeniowy dwustopniowy szeregowy jest przedstawiony na rys. 5. Jest to przełącznik stosowany w transformatorach dużych mocy. Przełącznik ma, dla każdej fazy uzwojenia trzy suwaki: K1, K2, K. Suwaki K1 i K2 pracują równoległe i ślizgają się po zaciskach: 1, 2, 3, 4, 5, 6 przyłączonych do zacsepów uzwojenia. Suwak K ma styk łukowy i ślizga się po zaciskach: a, b, c, d przyjmując kolejno pozycje: a, ab, b, bc, c, cd, d. Praca ustalona suwaka K jest na pozycjach a oraz d. Pozostałe pozycje są przejściowe po których ślizga się styk suwaka K w czasie przełączania zacsepów na uzwojeniu. Na pozycji b włącza się w obwód rezystor  $R$ , na pozycji bc włącza się w obwód zwojów przełączanego zacsepów rezystor  $2R$  i na pozycji c włącza się rezystor  $R$ . Na rys. 5 suwak K1 jest na pozycji 2, a su-

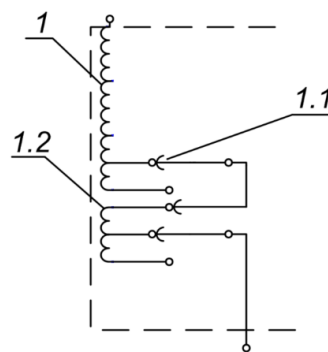
wak K na pozycji a. Takie ustawienie suwaków przełącznika zacze- pów tworzy gwiazdę uzwojenia na zacze- pie 2. Suwak K2 jest na pozycji 3 lecz jest wolny, przez niego prąd nie płynie i może być dowolnie przełączany. W celu przejścia na zacze- p 3 uzwojenia wy- starczy przesunąć suwak K na pozycję d. Z zacze- pu 3 można wrócić na zacze- p 2, a także na zacze- p 1. Przejście z zacze- pu 3 na zacze- p 1 to przesunięcie wolnego suwaka K1 na zacze- p 1 i przesunięcie suwaka K na zacze- p a. Z zacze- pu 2 można przejść na za- czep 4 przesuwając wolny suwak K2 na za- czep 4 i suwak K na pozycję d.



Rys. 5. Schemat połączenia zacze- pów na uzwo- jeniu twornika 1 z przełącznikiem zacze- pów 2 dwustopniowym szeregowym

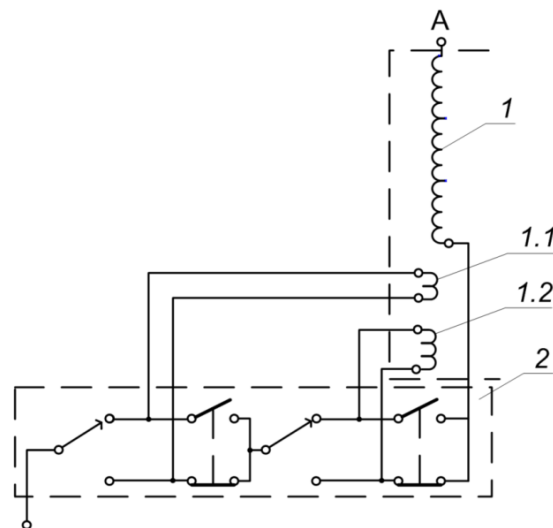
Prądnicą może mieć na uzwojeniu twornika jeden zacze- p do regulacji zgrubnej, o więk- szej liczbie zwojów i dodatkowe uzwojenie do regulacji drobnej o mniejszej liczbie zwojów. Rozwiązanie takie przedstawiono na rys. 6, na uzwojeniu twornika 1 jest za- czep 1.1 do regulacji zgrubnej i jest uzwoje- nie dodatkowe 1.2 z dwoma zacze- pami do regulacji drobnej.

Prądnicą 1 z jednym zacze- pem 1.1 do regu- lacji zgrubnej na uzwojeniu twornika pod- stawowym 1 i dwoma zacze- pami na uzwo- jeniu dodatkowym 1.2 do regulacji drobnej ma sześć stopni regulacyjnych napięcia. W tym rozwiązaniu przełącznik zacze- pów może być jednostopniowy jak na rys. 4, przy czym suwaki na zacze- pach 1.1 i 1.2 można przesunąć niezależnie.



Rys. 6. Zacze- p do regulacji zgrubnej 1.1 na uzwojeniu twornika podstawowym 1 i zacze- py do regulacji drobnej na uzwojeniu twornika dodat- kowym 1.2

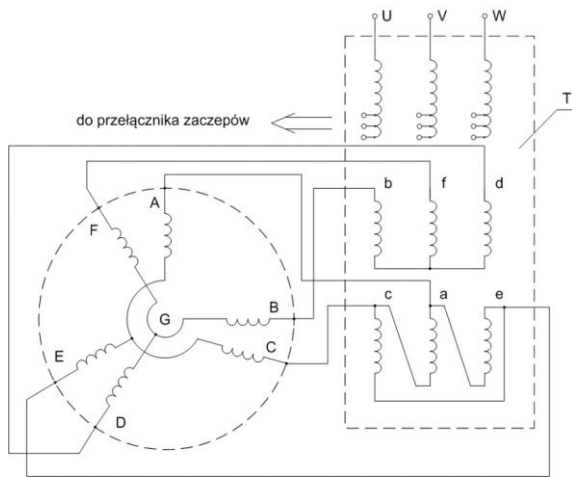
Prądnicą 1 może mieć także dodatkowe dwa uzwojenia regulacyjne: do regulacji zgrub- nej 1.1 o większej liczbie zwojów i do regu- lacji drobnej 1.2 o mniejszej liczbie zwojów. Rozwiązanie takie przedstawiono na rys. 7. Dodatkowe dwa uzwojenia regu- lacyjne 1.1 i 1.2 umożliwiają, przy pomocy czterech zacze- pów, uzyskać siedem stopni regulacji napięcia. Wymaga to dwóch prze- łączników zacze- pów i dwóch przełączników krzyżowych. Takie rozwiązanie trójfazo- wego przełącznika zacze- pów ma budowę złożoną.



Rys. 7. Uzwojenia twornika dodatkowe: 1.1 do regulacji zgrubnej i 1.2 do regulacji drobnej oraz połączenie uzwoje- n z przełącznikiem zacze- pów 2 krzyżowym

Jest jeszcze jeden wariant rozwiązania regu- lacji napięcia prądnicą wzbudzaną mag- nesami trwałymi pracującej przy stałej

prędkości obrotowej. Jest on przedstawiony na rys. 8.



Rys. 8. Prądnicza sześciofazowa i regulacja napięcia na zacze- pach transformatora 6/3 fazowego

Prądnicza jest sześciofazowa i współpracuje z transformatorem trójuzwojeniowym. Regulacja napięcia jest realizowana na zacze- pach uzwojenia wtórnego (wyjściowego) transformatora. Korzyści z tego rozwiązania to większy współczynnik grupy uzwojenia twornika prądniczy o 4,5% w stosunku do uzwojenia trójfazowego i eliminacja harmonicznych w napięciu wyjściowym: w prądniczy harmonicznej  $\nu = 3$  i w transformatorze  $\nu = 5$  i  $\nu = 7$ .

### 3. Podsumowanie

Prądnicza synchroniczna wzbudzana magnesami trwałymi może być konstrukcyjnie przystosowana do regulacji napięcia. Jednym z wariantów rozwiązania jest wykonanie uzwojenia twornika z zacze- pami i przyłączenie ich do przełącznika zacze- pów.

Przełączniki zacze- pów standardowo są stosowane w transformatorach.

Przedstawiono układy połączenia zacze- pów uzwojenia na postoju prądniczy i prądniczy pracującej. Zmiana zacze- pu na uzwojeniu prądniczy pracującej powinna być realizowana bez przerywania prądu obciążenia, bez iskier na stykach przełącznika i bez generacji przepięć w uzwojeniu. Najprostszym rozwiązaniem przełącznika zacze- pów, który spełnia te wymagania, jest przełącznik przedstawiony na rys. 4. Wymagania te spełnia także przełącznik zacze- pów z rys. 5 lecz jego budowa jest bardziej złożona. Rozwiązania przełączników zacze- pów przedstawione na rysunkach 2, 6 i 7 można stosować do przełączania zacze- pów uzwojenie w czasie postoju prądniczy.

Użyteczne może być rozwiązanie połączenia prądniczy sześciofazowej z transformatorem trójuzwojeniowym yd/Y z regulacją napięcia na zacze- pach uzwojeniu Y. W tym układzie eliminowane są harmoniczne napięcia 3, 5. i 7., a regulacja napięcia jest standardowa stosowana w transformatorach. Układ taki przedstawiono na rys. 8.

### Literatura

- [1]. Bernatt J., Gawron S., Glinka T.: *Układ uzwojeń prądniczy synchronicznej wzbudzonej magnesami trwałymi*. Pat. PL 234636. Z dnia 07.05.2019 r.
- [2]. Glinka T.: *Maszyny elektryczne i transformatory*. PWN, 2018 r. ISBN 978-83-01-20115-9.
- [3]. Kelasz J.: *Transformatory. Układy nastawiania przekładni*. WNT, Warszawa 1968, ss. 374.
- [4]. Suzuki Hitoshi, Morimatsu Masaki: *Stator of an AC generator*. European Patent Application EP 1 107 426 A2 z 13.06.2001 r.
- [5]. [www.komel.com.pl](http://www.komel.com.pl).