ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2000
Seria: ELEKTRYKA z. 175 Nr kol. 1473

Bogusław GRZESIK

HISTORIA ENERGOELEKTRONIKI

Streszczenie. W pracy zamieszczono w skrócie historię energoelektroniki. Wyróżniono trzy okresy jej rozwoju. Są to: energoelektronika jonowa, energoelektronika elektronowa oraz energoelektronika półprzewodnikowa. Omówiono zawory: jonowe, prostownik rtęciowy, ignitron oraz tyratron. Następnie zaprezentowano współczesne zawory energoelektroniczne, tranzystor bipolarny (BJT), tyrystor (SCR), tyrystor wyłączalny (GTO, IGCT), polowy tranzystor mocy MOSFET. Omówiono historię powstawania przekształtników w okresie energoelektroniki jonowej. W końcowej części pracy opisano początki rozwoju energoelektroniki polskiej oraz energoelektroniki w Politechnice Śląskiej.

HISTORY OF POWER ELECTRONICS

Summary. There is history of power electronics described in the paper. Three basic periods in its development are described. They are power ionics, electron tube power electronics and semiconductor power electronics. Ionic devices, mercury arc rectifiers, ignitron and thyratron have been presented in the work. The history of converter creation in the period of power ionics forms the subsequent part of the paper. Then contemporary switching devices, BJT, SCR, GTO, IGCT, MOSFET and IGBT have been introduced. Finally history of power electronics in Poland and in Silesian University of Technology are given briefly.

Celem artykułu jest przedstawienie szkicu historii energoelektroniki. Założono, że zawarta informacja obejmować będzie w kolejności: a) energoelektronikę w aspekcie światowym, b) europejskim, c) polskim oraz d) energoelektronikę w Politechnice Śląskiej.

Energoelektronika jest dziedziną elektrotechniki, której zadaniem jest przekształcanie energii elektrycznej za pomocą *przekształtników energoelektronicznych* (są to urządzenia zawierające zawory energoelektroniczne cyklicznie przełączane (diody, tranzystory, tyrystory) w taki sposób, aby możliwe było realizowanie trzech zadań:

- dopasowanie odbiornika do sieci zasilającej,
- sterowanie mocy odbiornika,
- uzyskanie maksymalnej sprawności procesu przekształcania, jak i procesów, w których przekształcanie jest jednym z elementów,

przy zachowaniu odpowiedniego poziomu kompatybilności elektromagnetycznej.

Przekształtnik jest podstawowym urządzeniem energoelektroniki. Przekształtnik energoelektroniczny łączy dwa systemy. Każdy z nich może mieć charakter źródła napięcia lub prądu i przy tym może to być źródło napięcia/prądu przemiennego (AC) lub źródło napięcia/prądu stałego (DC). Z tego względu wyróżnia się cztery zasadnicze typy przekształtników:

1) DC/DC (zasilacze napięcia stałego),
2) DC/AC (falowniki),
3) AC/DC (prostowniki, przekształtniki skompensowane),
4) AC/AC (regulatory napięcia przemiennego, przekształtniki częstotliwości).

Przekształtnik energoelektroniczny widziany od strony odbiornika może mieć właściwości źródła napięciowego lub prądowego. Z tego względu wyróżnia się przekształtniki napięciowe oraz przekształtniki prądowe. Ponieważ sieć zasilająca przekształtnik (sieć przemysłowa) jest siecią typu napięciowego, przekształtniki prądowe są realizowane poprzez wprowadzenie dodatkowych indukcyjności i sprzężeń zwrotnych (np. tyrystorowy falownik prądowy w przekształtniku częstotliwości).

Rozwój energoelektroniki wyznaczany był i jest poprzez rozwój zaworów. Zawory można podzielić na trzy zasadnicze grupy:

- zawory jonowe (prostowniki rtęciowe, ignitrony, tyratrony),
- zawory elektronowe (diody, triody próżniowe),
- zawory półprzewodnikowe (diody półprzewodnikowe, tranzystory bipolarne (BJT), tyrystory (SCR), tyrystory wyłączalne (GTO), tranzystory polowe mocy (MOSFET), tranzystory IGBT).

Znakomite właściwości zaworów półprzewodnikowych (wysokie napięcia, duże prądy, duża szybkość przełączania oraz niskie straty) spowodowały, że współczesna energoelektronika bazuje wyłącznie na tych zaworach. Należy zwrócić uwagę, na to, że w okresie, gdy energoelektronika oparta była na zaworach jonowych i elektronowych, przebadano i opracowano wiele przekształtników, które obecnie są realizowane na zaworach półprzewodnikowych i przy użyciu współczesnych technik sterowania.

Ze względu na rodzaj wykorzystywanych zaworów wyróżnić można trzy gałęzie energoelektroniki. Są to:

1) energoelektronika jonowa,
2) energoelektronika elektronowa oraz
3) energoelektronika półprzewodnikowa.

Omówienie rozwoju energoelektroniki jonowej pozwala prześledzić kolejne etapy powstawania przekształtników energoelektronicznych, począwszy od prostowników, poprzez

falowniki do przekształtników DC/DC oraz przekształtników AC/AC, tj., przekształtników, które osiągnęły dojrzałość techniczną w realizacji półprzewodnikowej. Przy tym energoelektronika elektronowa (oparta na lampach elektronowych), chociaż ma marginalne znaczenie ze względu na niskie moce, stanowi ważny element w całej energoelektronice.

Energoelektronika jonowa [11, 16, 26]

Za początek energoelektroniki jonowej można uznać rok 1903, kiedy przyznano dwa tytuły doktorskie na Uniwersytecie Columbia za odkrycie elektronu - dla J.J. Thomsona i P. Coopera Hewitta. Kolejnym ważnym wydarzeniem była wystawa poświęcona "przekształtnikowi Hewitta i lampie z parami rtęci" zorganizowana przez P.H. Thomasa 29 czerwca 1903 r. na spotkaniu dla członków AIEE w Cataract House, Niagara Falls. Cooper Hewitt opatentował swój prostownik w Niemczech (19.12.1902). Wniosek patentowy P.H. Thomasa, "System of Electrical Distribution" (28.12.1903), dotyczący przekształtnika o sterowaniu fazowym, był ważnym faktem w rozwoju energoelektroniki.

Pierwsze prostowniki rtęciowe (niesterowane) były budowane w naczyniach szklanych (USA, Niemcy) i uzyskiwano prądy rzędu 50 A z jednego elementu. Konstrukcja naczyń stalowych zwiększyła moc prostowników (technika próżniowa – B. Schäfer z Frankfurtu nad Menem). Wyniki badań w tym zakresie B. Schäfer opublikował w swojej pracy doktorskiej "On Mercury-Arc Rectifiers for High Powers" (Darmstadt Institute of Technology, 1912). Technologicznym wynikiem prac Schäfera był prostownik dwupulsowy 220 V, 300 A (1912), a następnie dwa prostowniki trójfazowe o łącznej mocy 300 kW.

Ważną datą jest rok 1913, w którym opatentowano zawór typu GTO, falownik oraz kaskadę asynchroniczną pod- i nadsynchroniczną.

W latach 1918-1939 zostały opracowane dalsze przekształtniki jonowe: cyklokonwertor (F.W. Meyer, 1922), czoper (W. Burstyn, 1924), przekształtnik do sterowania mocą bierną (M. Schenkel, 1932), cyklokonwertor do sterowania silnika indukcyjnego pierścieniowego od strony wirnika za pomocą cyklokonwertora (J. von Issendorf, 1935), przekształtnikowy system przesyłu energii za pomocą prądu stałego – HVDC (Stör, 1932) oraz sterowanie silnika synchronicznego za pomocą przekształtnika z zaworami półsterowalnymi (G. Keller, 1936).

Opracowanie prostownika jonowego sterowanego tyratronu przez A. Hulla w 1929 r., a następnie ignitronu przez J. Slepiana w 1931 r. wprowadziło do energoelektroniki nową jakość – możliwość sterowania mocy. Wymienione fakty wskazują na to, że idee znacznej liczby przekształtników zostały opracowane w okresie, gdy powstawała energoelektronika jonowa. Stanowiło to silna podstawę do budowy energoelektroniki półprzewodnikowej.

Energoelektronika elektronowa [11, 16, 26]

W latach dwudziestych przemysł elektrotechniczny USA skoncentrował się na lampach elektronowych/próżniowych z podgrzewaną katoda. Odkrycie przez Niemca A.T.B Wehnelta (1904) katody tlenkowej otworzyło drogę do postępu w radiotechnice i energoelektronice

małej mocy opartej na lampach elektronowych. W 1904 r. Anglik J.A. Fleming opracował diodę próżniową, a trzy lata później, w 1907 r., L. de Forest skonstruował triodę (terminologię "dioda", "trioda" wprowadził w r. 1919 Anglik W.H Eccles). Istotnym wkładem do energoelektroniki było skonstruowanie w 1905 r. w firmie General Electric diody mocy (kenotron – z greckiego: *keno* – próżnia, *tron* – przyrząd). Lampa ta charakteryzowała się względnie wysoka mocą – 19 kV, 0,1 A. Osiągnięcia technologiczne w tym zakresie stanowiły podstawę do technologii lamp jonowych z siatką – tyratronów. Energoelektronika bazująca na lampach elektronowych umożliwiała budowę prostych przekształtników o mocy od kilkunastu do kilkudziesięciu watów.

Energoelektronika półprzewodnikowa

Etap przedprzemysłowego rozwoju półprzewodnikowych zaworów trwał o 50 lat dłużej niż etap rozwoju prostowników jonowych. Termin półprzewodnik (semiconductor) był powszechnie używany w elektrofizyce od 1783 r. I od 1902 roku wiedziano też, że przy przepływie prądu półprzewodniki wykazują efekt "unipolarny", lecz elementy półprzewodnikowe nie były stosowane do procesu prostowania prądu aż do początku dwudziestego wieku.

Za pierwszą pracę dotyczącą diody uznaje się pracę F. Brauna z 1874 („Über die Stromleitung durch Schwefelmetalle" [O przepływie prądu przez siarczki metaliczne]). Odkrył on, że m.in. galena (siarczek cynku) i piryt mają właściwości prostownicze.

W 1904 roku w Wiedniu F. Pawlowski opatentował "elementy prostownicze z stałymi elektrolitami", gdzie podstawowym materiałem były siarka i miedź. Jako przykład pokazał on kompaktowy układ mostkowy. W rok później O. Weigel w Gottingen pisze dysertację "On Solitd-State Unipolar Conductors". W 1906 r. w „Electrical World" pojawia się artykuł G.W. Pickarda, w którym opisuje on detektor krzemowy, tj. diodę. W 1906 i 1907 r. w „Physical Review" G.W. Pierce opublikował wyniki systematycznych badań "prostowników krystalicznych", gdzie po raz pierwszy pokazana została charakterystyka napięciowo-prądowa diody w postaci wykresu (10 V, kilka mA).

W drugiej połowie lat dwudziestych podjęto próby opracowania sterowanych elementów półprzewodnikowych. Około roku 1925 J.E. Lilienfeld w Nowym Jorku opatentował trójelektrodowy element o strukturze ciała stałego. W 1929 r. w Berlinie zgłoszony został patent na prostownik złączowy z dwoma elektrodami metalowymi oddzielonymi warstwą rozdzielającą, gdzie elektroda sterownicza została umieszczona pomiędzy elektrodami głównymi.

Lata trzydzieste stanowią kamienie milowe w powstaniu teorii półprzewodników.

W 1931 r. w Anglii A.H. Wilson wprowadza do fizyki półprzewodników pojęcie "dziura". W 1936 r. Davydow w ZSRR i W. Schottky z Zurichu podejmują badania w fizyce półprzewodników. W 1941 r. w patencie USA J.H. Scaff używa terminów "warstwa P, warstwa N".

W okresie międzywojennym prostowniki półprzewodnikowe nie były używane w technologii wysokoprądowej. Stosowano tylko prostowniki selenowe (polikrystaliczne) w zakresie

względnie wysokich prądów. Właściwości selenu jako półprzewodnika wykazującego właściwości prostownicze zostały odkryte po raz pierwszy przez W. Siemansa w Niemczech i W.G. Adamsa w Anglii w 1876 r.

Podczas II wojny światowej germanowe diody (A.H. Winkler) małej mocy były używane w systemach radarowych.

Od początku lat pięćdziesiątych stosowane były germanowe diody mocy. W 1950 r. w USA opracowano diody na prąd 100 A. W 1955 r. Niemcy, ZSRR, Wielka Brytania i Szwajcaria opanowały technologię germanowych diod mocy. W 1956 technologię diod germanowych opanowano w Czechosłowacji. W 1956 r pierwszy pojazd szynowy z diodami germanowymi został wprowadzony do eksploatacji w Wielkiej Brytanii w Lancaster.

Krzemowe diody mocy opracowane zostały wkrótce po opracowaniu diod germanowych. Od końca lat pięćdziesiątych rozpoczęto budowę i eksploatację lokomotyw z układami na diodach krzemowych. Francja, Japonia, Niemcy (1959), Czechosłowacja i ZSRR (1961) jako pierwsze wyposażyły swoje lokomotywy w te prostowniki. Pierwszym zastosowaniem na dużą skalę były lokomotywy wyposażone w niemieckie systemy prostownicze oparte na diodach krzemowych, które wyprodukowano dla kolei podkaukaskich funkcjonujących w rejonie Rostowa (1961 r.)

W 1957 roku w General Electric Research Laboratories opracowano nowy w tamtych czasach przyrząd elektroniczny – tyrystor (czterowarstwowy zawór energoelektroniczny). Od połowy lat sześćdziesiątych rozpoczęto produkcję i stosowanie tyrystorów dużej mocy.

W 1964 roku wyprodukowano i wprowadzono do eksploatacji w USA lokomotywy z napędem prądu stałego z prostownikami tyrystorowymi o mocy 10 MW.

W 1967 r. użyto tyrystory po raz pierwszy w eksperymentalnej linii przesyłowej prądu stałego (HVDC) w Szwecji.

Badania nad tyrystorem GTO trwały od chwili skonstruowania tyrystora konwencjonalnego. Jeden z ważniejszych artykułów na ten temat ukazał się w roku 1963 (H.F. Storm). Tyrystory GTO pojawiły się na rynku na początku lat osiemdziesiątych. Na przykład firma Marconi oferowała w 1986 r. przyrządy o napięciu $U_{DRM} = 4500$ V i prądzie $I_{TCM} = 3120$ A. Umożliwiały one pracę prze częstotliwościach rzędu kilkuset Hz. Posiadając możliwość wyłączania wymagały złożonego drajwera o dużej mocy oraz układów odciążających. W wyniku stałego postępu technologicznego zostały opracowane tyrystory IGCT, które umożliwiły pracę przy częstotliwości około 2 kHz, przy niskim napięciu przewodzenia, nie wymagając przy tym układów odciążających. Drajwer tego tyrystora ma znacznie mniejszą moc w porównaniu z drajwerem trystora GTO. Przykładem może być tyrystor IGCT firmy ABB 5SGX26L45 $U_{DRM} = 4500$V i prądzie $I_{TCM} = 2500$ A, oferowany w 1998 r. Obecnie Toshiba oferuje tyrystory typu GTO o napięciu 6000 V i prądzie 6000 A. Tystory IGCT stanowią konkurencję dla tranzystorów IGBT przez to, że mają obecnie wyższe napięcia i prądy znamionowe. Tyrystory IGCT stosowane są w przekształtnikach energoelektronicznych napędowych o najwyższych mocach. Przykładami mogą być system nagrzewania indukcyjnego

4 MW, 5 kHz i 2 MW, 10 kHz oraz napęd częstotliwościowy francuskiego superszybkiego pociągu TGV Eurostar – 12200 kW, 25 kV AC (700 pasażerów).

Równolegle z pracami nad tyrystorem rozwijano prace nad tranzystorem bipolarnym, którego odkrycie datowane jest na koniec lat pięćdziesiątych. W połowie lat osiemdziesiątych oferowano tranzystory o napięciu 1500 V i prądzie 5 A; miały one zastosowanie w odbiornikach TV w układzie odchylania. W tym samym czasie dostępne były tranzystory w układzie Darlingtona o napięciu 500 V i prądzie 200 A. Używano je w napędzie elektrycznym głównie prądu stałego i w układach zasilania bezprzerwowego (UPS). Dalszy postęp technologiczny umożliwił opracowanie tranzystorów o napięciu 1000 V i prądzie 300 A (Toshiba, 1989 r.). Tranzystorów bipolarnych, jako samodzielnych przyrządów przełączalnych, dalej nie rozwijano. Opanowana zaawansowana technologia stanowiła punkt wyjścia do innej, nowej koncepcji, do tranzystorów IGBT.

Tranzystor MOSFET [15] jest kolejną propozycją w kierunku ulepszenia zaworów energoelektronicznych. Jest przyrządem, który ma najdłuższą historię, a jego działanie jest oparte na efekcie polowym. Został opatentowany w latach dwudziestych przez J.E. Lilienfelda i w latach trzydziestych przez O. Heila. Początkowe próby skonstruowania sprawnego tranzystora polowego skończyły się niepowodzeniem ze względu na zanieczyszczenia powierzchni oraz na stany elektronów na powierzchni, które uniemożliwiają ruch ładunków elektrycznych, co powoduje zablokowanie oddziaływania pola elektrycznego na ładunki.

Istotnym krokiem w technice przyrządów polowych było opracowanie tranzystora JFET – junction field-effect transistor przez W. Shockleya w 1952 r. Produkcję JFET-ów umożliwiła technologia planarna (1960 r.). Dalsze ulepszenia technologiczne umożliwiły opracowanie tranzystora MOSFET – metal-oxide-semiconductor field-effect transistor. Tranzystor ten był bliższy ideii Lilienfelda i Heila. Opracowany tranzystor miał strukturę planarną, która była wykorzystywana w układach scalonych o gęstości 1 mln tranzystorów w jednym układzie. Dla celów energoelektroniki struktura planarna nie jest przydatna, ponieważ tranzystor mocy powstaje w wyniku łączenia równoległego tranzystorów elementarnych. Ponadto w celu uzyskania odpowiednio wysokiego napięcia pracy dren–źródło należy zwiększyć odległość pomiędzy drenem i źródłem. W strukturze planarnej w najprostszej wersji długość kanału jest modulowana. Innym mankamentem jest konieczność wykonania połączenia równoległego drenu, źródła i bramki. W wyniku intensywnych badań w latach siedemdziesiątych doszło do opracowania struktury "wertykalnej", w której materiał podłoża pracuje jako dren. W taki sposób uzyskano technologię do przemysłowej produkcji tranzystorów mocy MOSFET (obecnie dostępne są przyrządy mocy, które mogą scharakteryzować produkty firmy Mitsubishi: FS14SM-18A, 900 V, 14 A, FS50KM-3, 150 V, 50 A).

Najnowszym osiągnięciem w technologii tranzystorów typu polowego jest CoolMOS [28], produkt firmy niemieckiej Infineon Technologies. Głównymi korzystniejszymi parametrami w tej technologii jest liniowa zależność rezystancji $R_{DS(on)}$ od napięcia znamionowego i zmniejszone czasy przełączeń.

Naturalnym krokiem w rozwoju zaworów energoelektronicznych były tranzystory IGBT, łączące zalety tranzystorów bipolarnych oraz polowych. Trwa doskonalenie tych tranzystorów [29]. Nowa technologia firmy Infineon (PCIM'00) doprowadziła do zmniejszenia napięcia przewodzenia przy jednoczesnym zwiększeniu szybkości diody przeciwrównoległej. Firma EUPEC na konferencji PCIM'00 zadeklarowała tranzystor IGBT o napięciach do 6,5 kV oraz prądach do 6500 A. Przy czym od kilku lat w ofercie tej firmy są tranzystory 2,5 kV, 500 A i 3,5 kV, 400 A.

Oprócz zaworów (diod, tyrystorów, tyrystorów GTO, IGCT, tranzystorów MOSFET, IGBT) przekształtniki energoelektroniczne wymagają elementów pasywnych. Są to kondensatory, dławiki i transformatory. Postępy w technologii wynikają z nowych materiałów i nowych technologii konstrukcji. Doprowadziło to do tego, że współczesne kondensatory typu elektrolitycznego dopuszczają znaczną składową zmienną prądu przy dość niskich wartościach indukcyjności wewnętrznej. Do najnowszych konstrukcji należą superkondensatory. W zakresie transformatorów o postępie stanowią materiały magnetyczne, jak i nowe konstrukcje uzwojeń i magnetowodów. Względnie nowymi materiałami są materiały amorficzne, materiały nanokrystaliczne oraz ferryty. Te ostatnie pozwalają na konstrukcje transformatorów energoelektronicznych pracujących przy częstotliwościach do kilku MHz. Oprócz transformatorów rdzeniowych intensywnym badaniom poddano transformatory powietrzne, które mają bardzo korzystne właściwości energetyczne i technologiczne w obszarze częstotliwości kilkuset kHz do kilku MHz, osiągając sprawność rzędu 0,96.

Ważnym czynnikiem wpływającym istotnie na właściwości przekształtników jest konstrukcja obwodów głównych oraz drajwerów lub nawet układu sterowania. Rozwiązanie systemu chłodzenia silnie wpływa na parametry energetyczne i technologiczne przekształtników. Nowe technologie pozwalają na produkcję bloków inteligentnych o zmniejszonych indukcyjnościach połączeń, a tym samym o zmniejszonych stratach przełączania.

Analiza przekształtników prowadzona była od samego początku istnienia prostowników – Poluj [18] przedstawił w 1891 analizę prostownika dwupulsowego, wykorzystując do tego szeregi Fouriera. Analiza była prowadzona przy zastosowaniu modelu odcinkowo-liniowego. Były to zwykle modele bardzo prostych przekształtników dla stanów ustalonych. W wielu przypadkach modele te budowane były na podstawie informacji uzyskanych za pomocą oscyloskopu [19], który pod nazwą "rury Browna" jest znany od roku 1897. Wyraźny postęp w analizie przekształtników energoelektronicznych wprowadziły komputery i to zarówno cyfrowe, jak i analogowe. Szczególnie ważne było opracowanie modeli globalnych, a w tym stałotopologicznych [20, 21]. Umożliwiły one analizę przekształtnika bez wstępnych informacji o sekwencji schematów zastępczych. Pierwszą publikacją, w której opisano analogowy model stałotopologiczny, jest praca Navratila z 1966 r. [20], którą rozwinął Mustafa [21]. Niezależnie taki sam model przekształtnika energoelektronicznego opracował Foch w 1974 [22]. Krajowe wyniki badań w zakresie modelowania i symulacji przekształtników energoelektronicznych zawierają prace Szczęsnego [23] – 1976 r., Deskura [24] – 1981 r. oraz Cz.

Myrcika [25] – 1984. R. Szczęsny kontynuował badania doprowadzając do opracowania efektywnego programu TCAD [30].

Za pierwszą w świecie konferencję poświęconą energoelektronice należy uznać konferencję 'Rectifier in Industry", Pitsburgh, 1952 r. "Konferenz über die Leistungelektronik", Budapest 1971 r. jest pierwszą w Europie konferencją energoelektroniki. Następną konferencją zorganizowaną w Europie było IFAC Symposium on Control in Power Electronics and Electrical Drives, Duesseldorf, Oct. 7-9, 1974. Należy wspomnieć, że do początku lat osiemdziesiątych w Europie Wschodniej organizowane były konferencje międzynarodowe w ramach RWPG. Ich kontynuacją stała się konferencja Power Electronics and Motion Control (PEMC). Od 1985 r. organizowana jest w cyklu dwuletnim konferencja EPE. Obydwie te konferencje są najważniejszymi europejskimi konferencjami poświęconymi energoelektronice.

Początki energoelektroniki w Polsce sięgają końca lat pięćdziesiątych. Prace nad przekształtnikami energoelektronicznymi podjęto w kilku ośrodkach w Polsce. Były to: Politechnika Warszawska, Politechnika Gdańska, Politechnika Łódzka, Politechnika Poznańska, Politechnika Śląska, Instytut Elektrotechniki, Apator.

Początkowo badano same tyrystory. Kolejnym krokiem były łączniki przerywacze prądu stałego i prostowniki tyrystorowe do napędu prądu stałego. Należy zwrócić uwagę na to, że w AGH podjęto systematyczne badania nad przemysłowym napędem prądu stałego – wyniki wdrożono w wielu przedsiębiorstwach krajowego przemysłu hutniczego. Na przełomie lat sześćdziesiątych i siedemdziesiątych podjęto prace nad przekształtnikami częstotliwości przeznaczonymi do napędów prądu przemiennego. Były to bezpośrednie przekształtniki częstotliwości, w tym cyklokonwertory (Politechnika Warszawska, Instytut Elektrotechniki Warszawa, Politechnika Śląska) oraz przekształtniki z obwodem napięcia stałego z prostownikiem tyrystorowym, filtrem LC oraz falownikiem napięcia typu $2\pi/3$ (Politechnika Warszawska, Politechnika Gdańska, AGH), w tym samym czasie stosowano sterowanie skalarne. Następnie podjęto prace nad przekształtnikami częstotliwości z modulacją szerokości impulsów do napędu częstotliwościowego (Politechnika Śląska, 1970 r.). Trudności wynikające z ograniczeń, które narzucały tyrystory, skierowały uwagę badaczy na przekształtniki częstotliwości z falownikiem prądu (Politechnika Warszawska, Politechnika Śląska, AGH). W rezultacie powstały napędy, których kilkanaście egzemplarzy zostało wdrożonych w przemyśle krajowym w latach osiemdziesiątych (250 kW, 500 V) – Politechnika Śląska, Politechnika Warszawska, AGH. Ważnym osiągnięciem krajowym było opracowanie w latach osiemdziesiątych przekształtnika częstotliwości o mocy około 1 MW (Instytut Elektrotechniki - Warszawa). Istotnym wsparciem dla krajowej energoelektroniki był import najnowszej, w tamtych czasach, technologii produkcji diod i tyrystorów firmy Westinghouse. Wynikiem badań były publikacje [2, 5, 7, 8, 9, 10, 31, 32, 33].

Początki energoelektroniki w Politechnice Śląskiej to początek lat sześćdziesiątych. Początkowo badania skupiały się na przekształtnikach tyratronowych (prostownik sterowany

[33], kaskada asynchroniczna, cyklokonwertor). Etapem następnym były badania związane z nowym przyrządem przełączającym – tyrystorem (ASEA i ZSRR). Kolejnym etapem były badania poświęcone prostownikowi tyrystorowemu. Na przełomie lat sześćdziesiątych i siedemdziesiątych podjęto badania nad trzema przekształtnikami tyrystorowymi – przekształtnikiem częstotliwości MSI, cyklokonwertorem i regulatorem napięcia przemiennego. Rezultatem były modele przemysłowe i prace doktorskie. Niektóre wyniki badań nad energoelektroniką, które były prowadzone w początkowej jej fazie zawarto w pracach [10, 31, 32, 33].

W nowych warunkach ekonomicznych ośrodki dotychczas prowadzące badania (w tym i Politechnika Śląska) kontynuują je przy silnym wsparciu KBN. Przemysł wykazuje nieco mniejsze zainteresowanie. Nowe warunki ekonomiczne przyniosły nowe szerokie możliwości współpracy z ośrodkami badawczymi i przemysłem krajów uprzemysłowionych (np. V Ramowy Program). Pozwoli to w przyszłości na pełniejsze wykorzystanie znacznego krajowego potencjału badawczego w zakresie energoelektroniki.

LITERATURA

1. Bedford B.D., Hoft R.G.: Principles of inverter circuits. J. Wiley, New York 1964.
2. Figurzyński Z., Frydryszak A.: Prostowniki w energoelektryce. WNT, Warszawa 1964.
3. Gentry F.E., Gutzwiller F.W., Holonyak N., Zastrov E.E.: Semiconductor Controlled Rectifiers. Prentice Hall, London1964.
4. Haskovec J., Lstiurek F., Zika J.: Tyristory. SNTL, Praha 1966.
5. Banaszkiewicz A.: Tyrystory. WNT, Warszawa 1966.
6. Sitnik N. Kh.: Siłowaja połuprowodnikowaja tiechnika. Energija, Moskwa 1968.
7. Tunia H., Winiarski B.: Układy elektroniczne w automatyce napędu. WNT, Warszawa 1969.
8. Luciński J.: Układy tyrystorowe. WNT, Warszawa 1972.
9. Tunia H., Winiarski B.: Podstawy energoelektroniki. WNT, Warszawa 1975.
10. Kuczewski Z.: Energoelektronika. Skrypt Politechniki Śląskiej nr 734, Gliwice 1975.
11. Kloss A.: History of European Power Electronics. First European Conference on Power Electronics and Applications, Proc., Vol. 4, Brussels, 16-18 October, 1985, pp. 1-6.
12. Gerlach W.: Thyristoren, Springer-Verlag, Heildelberg 1981.
13. Baliaga B.J., Chen D.Y.: Power Transsistors. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York 1984.
14. Tylor P.D.: Thyristor design and realization. J. Wiley & Sons Ltd., Chichester 1987.
15. Grant D.A.: Gowar J.: Power MOSFETS. J. Wiley & Sons Ltd., New York 1989.
16. Kloss A.: Auf den Spuren der Leistungselektronik. VDE-Verlag GmbH, Berlin, Offenbach 1990.
17. Lee T. (mailto:tmlee@ee.stanford.edu) History o' Diodes, March 24, 1999.

18. Poluj J.: Über die Wirkungen gleichgerichterer sinusartiger el. Mot. Kräfte, Sitzugsber. Math. Nat. Classe der Akad. der Wiss. (1891) S. 7, Wien (Fourier-Analyse).
19. Braun Karl Ferdinand, http://encarta.msn.com/index/conciseindex/B9/0B974000.htm
20. Navratil S.: Nachbildung einiger Gleichrichterschaltungen im Stationaren und Nichtstationaren Betrieb auf dem elektronischer Analogrechner, Acta Technica CSAV, nr 11, 1966, pp. 152-160.
21. Mustafa G.N.: Priamoj mietod analiza wentil'nych schiem na AWM, Elektrotechniczeskaja promyszlennost', Ser. Prieobrazowatielnaja tiechnika, 1971, wyp. 23-24, s. 24-25.
22. Foch H., Trannoy B., Faucher J.: Complete simulation of a static converter by digital and analogue methods, IFAC Symposium, Duesseldorf, Oct. 7-9, 1974.
23. Szczęsny R.: Wybrane problemy modelowania cyfrowego, praca doktorska, Politechnika Gdańska, Gdańsk 1976.
24. Deskur J.: Modele matematyczne tyrystorowych układów przekształtnikowych, PWN, Warszawa - Poznań 1981.
25. Myrcik Cz.: Modelowanie i symulacja przekształtnikowych układów napędowych. Skrypt Politechniki Śląskiej nr 1119, Gliwice 1984.
26. Kloss A.: History of Power Electronics, PEMC'98, Prague, Czech Republic, pp. K2-1÷K2-6.
27. Pavelka J., Čerovsky Z.: History and Present State of Art in Power Electronics and Electrical Drives in the Czech Republic, PEMC'98, K3-1÷K3-8.
28. Lorenz L., März M.: CoolMOS™ - A new approach towards high efficient power supplies, PCIM'99, Nürnberg, June 22-24, 1999, pp.25-33.
29. Laska T., Lorenz L., Mauder A.: The Field Stop IGBT Concept with an Optimized Diode. PCIM'00, Nürnberg, June 2000, pp.1-7.
30. Szczęsny R.: Komputerowa symulacja układów energoelektronicznych. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1999.
31. Kuczewski Z., *et al.*: Tyrystorowe napędy elektryczne. Wyd. SITPH, Katowice 1970.
32. Kuczewski Z. *et al.*: Laboratorium energoelektroniki. Skrypt Politechniki Śląskiej nr 383, Gliwice 1972.
33. Kuczewski Z. *et al.*: Laboratorium napędu elektrycznego. Skrypt Politechniki Śląskiej nr 173, Gliwice 1967.

Wpłynęło do Redakcji dnia 21 sierpnia 2000 r.