



**INTELIGENTNIE  
STEROWANY DRENAŻ ELEKTRYCZNY**

**INTELLIGENTLY  
CONTROLLED ELECTRIC DRAINAGE**

Wojciech Sokólski, Paweł Sokólski

SPZP CORRPOL Gdańsk

Słowa kluczowe: ochrona katodowa, drenaż elektryczny, regulacja, automatyka  
Keywords: cathodic protection, electric drainage, control

**Streszczenie**

W opracowaniu przedstawiono nową koncepcję konstrukcji drenaży elektrycznych z wykorzystaniem regulacji prądu wyjściowego automatycznie dostosowującego się do wielkości i charakteru prądów błądzących. W rozwiązaniu technicznym wykorzystuje się drenaż sterowany wykonany na bazie tranzystorów mocy typu MOSFET, w którym funkcję regulatora spełnia mikrokontroler. Jego zadaniem jest stały pomiar napięcia pomiędzy konstrukcją a szynami, prądu drenowanego oraz potencjału zabezpieczanego obiektu i na podstawie ich korelacji i odpowiednich algorytmów obliczeniowych ciągle kontrolowanie pracy drenażu w taki sposób, aby spełniane było wybrane kryterium zapewniające zabezpieczenie przeciwkorozyjne obiektu, np. eliminowanie polaryzacji anodowej, zapewnienie ochrony katodowej lub inne przewidziane w normach itp.

**Abstract**

In the paper a new concept has been presented of electric drainage construction with the use of automatic output current control, adapting to the magnitude and character of stray currents. In the technical solution controlled drainage is used based on MOSFET type power transistors, in which a microcontroller acts as controller. Its task is constant measurement of voltage between the structure and rails, of drained current and the potential of protected object and on the basis of their correlation and respective calculation algorithms continuous control of drainage operation in such a way so that a selected criterion is met, ensuring anticorrosion protection of the object, e.g. elimination of anodic polarisation, ensuring cathodic protection or others.

## 1. Wprowadzenie

Prądy błędzące stanowią bez wątpienia największe zagrożenie korozyjne dla stalowych konstrukcji znajdujących się w ziemi, głównie obiektów długich – rurociągów lub panczerzy kabli. Przepływając przez granicę faz metal – środowisko elektrolityczne biorą udział w zachodzących w tej płaszczyźnie reakcjach elektrochemicznych odpowiedzialnych za przebieg procesu korozyjnego – w zależności od kierunku przepływu – przyspieszając lub hamując ten proces. Ponieważ gęstość prądów błędzących może być znacząco większa od prądów korozyjnych, efekty ich oddziaływań ujawniają się dużo szybciej niż naturalne procesy korozyjne, a ich skutkiem są znaczące ubytki korozyjne np. stalowych ścianek rurociągów. Stąd eliminowanie prądów błędzących stanowiło jedną z pierwszych aktywnych technik ochrony przeciwkorozyjnej konstrukcji podziemnych, w których do hamowania procesów korozyjnych wykorzystywano odpowiednio ukierunkowany przepływ stałego prądu elektrycznego. Zasada tego rodzaju zabezpieczenia jest prosta: prąd z zabezpieczanej konstrukcji należy odprowadzić drogą elektronową za pomocą przewodu elektrycznego tak, aby w zagrożonym miejscu nie wypływał on z metalu do środowiska elektrolitycznego (ziemi). Odprowadzenie prądu w taki właśnie sposób do jego źródła nazwano drenażem elektrycznym. Stosuje się go przede wszystkim do odprowadzania prądów błędzących upływających z trakcji elektrycznych prądu stałego (kolejowej, tramwajowej), realizując połączenie drenażowe pomiędzy zabezpieczaną konstrukcją a szynami. Ponieważ pierwsze zastosowania drenaży elektrycznych sięgają przełomu XIX i XX wieku, zgromadzone doświadczenia i opis zachodzących zjawisk zostały wielokrotnie opisane w różnych aspektach, więc nie sposób się w tym miejscu odwołać źródeł literaturowych. Warto jednak na wstępie przypomnieć niektóre ważne dla omawianego niżej zagadnienia fakty będące przedmiotem wcześniejszych badań.

Natężenie prądu płynące w połączeniu drenażowym uzależnione jest w sposób oczywisty od rezystancji obwodu drenażowego, a w konsekwencji także i potencjał zabezpieczanego obiektu będzie zależał od tej wartości. Te powiązania funkcyjne, nazwane charakterystykami drenaży elektrycznych, opisane zostały w literaturze radzieckiej i przypomniane na jednej z poprzednich konferencji PKEOpK [1]. Na ich podstawie można wykazać, że przy odpowiedniej rezystancji w połączeniu drenażowym potencjał konstrukcji przestaje zależeć od napięcia konstrukcja szyna i drenowanego prądu, co wielokrotnie zostało potwierdzone w praktyce po upowszechnieniu się badań prądów błędzących metodą korelacyjną [2–6]. Prace te także wykazały, że w przypadku oddziaływań prądów błędzących o stochastycznym charakterze zmienności, a taki występuje w przypadku trakcji tramwajowych w aglomeracjach miejskich, o zagrożeniu korozyjnym decyduje stopień ich asymetrii. Wydaje się, że w praktyce nie jest ta wielkość wykorzystywana w charakterze kryterium dopuszczalnego oddziaływania prądów błędzących.

Aktualna norma [7] wprowadza pewne zamieszanie, ponieważ kryteria szkodliwego oddziaływania prądów błędzących nie są określone w sposób jednoznaczny, a ponadto rozróżniony jest przypadek konstrukcji chronionej i niechronionej przy pomocy ochrony katodowej. Wydaje się, że przyjęto zasadę, że obiekt niechroniony może być poddawany polaryzacji anodowej (szkodliwej interferencji) w stopniu nie większym niż 20 mV (bez IR), zaś chroniony katodowo – nie powinien wskutek oddziaływań zmieniać swojego potencjału ani w kierunku dodatnim, ani ujemnym poza zakres ochrony katodowej. Nie odniesiono się także do faktu zmienności mierzonych wielkości, uznając jednak, że celowe jest analizowanie wartości średnich z okresu 24-godzinnego. Jako naczelną zasadę przyjęto stosowanie takich roz-

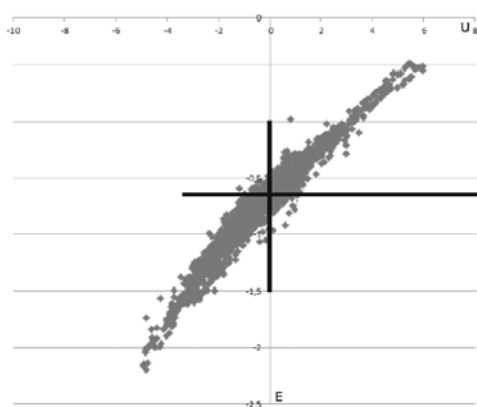
wiązań technicznych urządzeń zabezpieczających, które skutecznie pracują przy jak najmniejszym przepływie prądu ochronnego.

## 2. Drenaże elektryczne polaryzowane

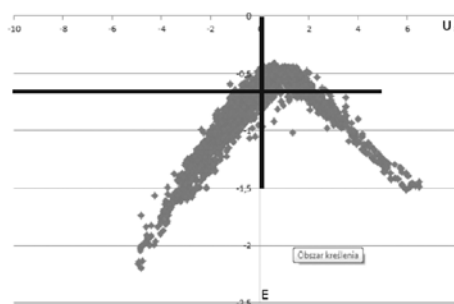
W odróżnieniu od idei stosowania drenaży elektrycznych, jako jednej z technik umożliwiających wywołanie polaryzacji katodowej konstrukcji i uzyskanie wymaganego efektu ochrony katodowej, która na wzór koncepcji radzieckich była stosowana także w Polsce [8–10], obecne podejście zaprezentowane w normie PN-EN 50162 takich wymagań nie stawia. Zadaniem drenaży, zarówno polaryzowanego, jak również wzmocnionego jest jedynie eliminowanie szkodliwego oddziaływania prądów błądzących – interferencji. Niestety kryteria pracy tych urządzeń nie są określone w normie, dopuszcza się stosowanie regulacji automatycznej, domyślnie – regulacji granicznej wartości polaryzacji (potencjału).

W rejonie oddziaływań trakcji prądu stałego stosuje się drenaże polaryzowane i drenaże wzmocnione [7]. Drenaż wzmocniony posiada własne źródło prądu stałego i włączany jest w obwód ochrony pomiędzy zabezpieczaną konstrukcją a obwody powrotne trakcji, analogicznie jak stacja ochrony katodowej (szyny stanowią anodę) – ten rodzaj drenażu elektrycznego nie jest przedmiotem niniejszego opracowania.

Drenaż polaryzowany umożliwia przepływ jedynie w jedną stronę – od zabezpieczanego obiektu do szyn zelektryfikowanej trakcji, co zapewnione jest przez umieszczenie w tym obwodzie elementu prostującego, zazwyczaj diody półprzewodnikowej. Działanie drenażu polaryzowanego najlepiej prześledzić analizując wygląd widm korelacyjnych – przed i po zwarceniu obwodu drenażu. Przykład takich widm ilustrują rys. 1 i rys. 2.



Rys. 1. Widok i położenie w układzie współrzędnych widma korelacji  $e=f(u)$  przed włączeniem drenażu polaryzowanego



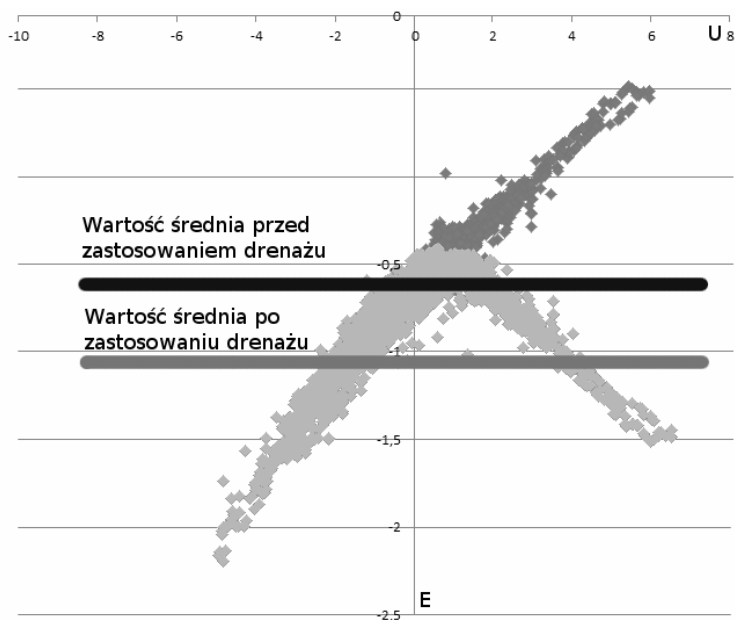
Rys. 2. Widok i położenie w układzie współrzędnych widma korelacji  $e=f(u)$  po włączeniu drenażu polaryzowanego

Rys. 1 przedstawia typowe widmo korelacyjne zależności potencjału konstrukcji od napięcia konstrukcja – szyny w znakoprzemiennej strefie oddziaływania prądów błądzących wpływających z trakcji tramwajowej prądu stałego. Ćwiartka I układu współrzędnych odzwierciedla prawdopodobieństwo wystąpienia polaryzacji anodowej, zaś III polaryzacji kato-

dowej na powierzchni badanego obiektu. Wykonanie pomiędzy tą konstrukcją a szynami połączenia drenazowego powinno spowodować (zgodnie z teorią [1]) obrócenie się widma w prawo wokół środka układu, jednak ze względu na obecność w tym połączeniu elementu prostującego (diody krzemowej), obrót następuje wyłącznie tej części widma, która znajduje się w I ćwiartce układu – porównaj rys. 2. Kąt obrotu uzależniony jest od rezystancji obwodu drenazowego. W wyniku takiego działania zmniejszony został czas i wielkość polaryzacji anodowej, a zwiększona odpowiednio polaryzacja katodowa.

Ze względu na to, że dioda krzemowa przewodzi prąd powyżej ok. 0,7 V, zagięcie krzywej następuje dopiero przy tym napięciu. W rezultacie w I ćwiartce pozostaje pewna część widma, która odwzorowuje prawdopodobieństwo pozostałej po włączeniu drenazu polaryzowanego polaryzacji anodowej. Wielkość tej polaryzacji każdorazowo zależy od szeregu czynników, np. rodzaju diody prostowniczej, położenia całego widma korelacji w układzie współrzędnych, rezystancji obwodu. Przy odpowiednio dobranym oporze elektrycznym prawa część widma może być równoległa do osi napięcia, co oznacza, że wartość potencjału konstrukcji może być w tym obszarze stała i niezależna od napięcia konstrukcja-szyny.

Widocznym efektem działania drenazu polaryzowanego, z czego nie zawsze zdają sobie sprawę jego użytkownicy, jest przesunięcie wartości średniej potencjału konstrukcji w kierunku ujemnym, co ilustruje rys. 3.



Rys. 3. Przesunięcie wartości średniej potencjału wskutek włączenia drenazu

Efekt ten jest w zasadzie oczywisty, jednak – co należy podkreślić - nie wykorzystywany jako kryterium działania drenazu, chociaż intuicyjnie odpowiada polaryzacji katodowej. Niestety taki efekt nie jest stały w czasie, ponieważ zmienia się zgodnie z rytmem dobowym oddziaływania prądów błędzących, a ponadto nie jest wprost proporcjonalnie zależny od

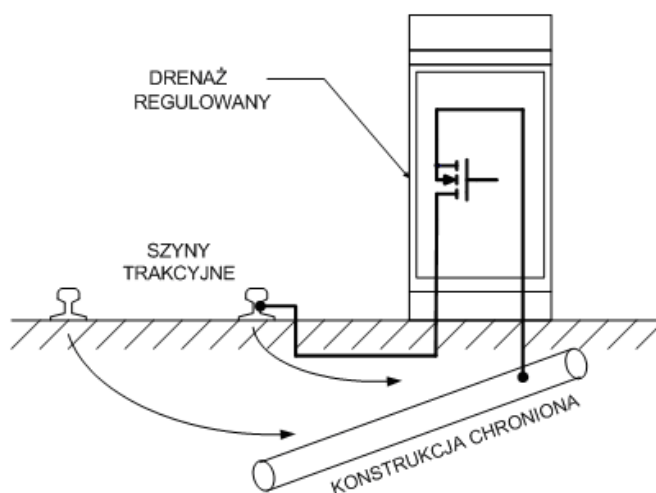
intensywności oddziaływania prądów błądzących. Można byłoby ostatecznie uznać, że do oceny należałoby użyć wartości określonych w ciągu całej doby („całodobowych”).

Warto zwrócić uwagę także na to, że w zależności od rezystancji drenażu zmienia się także udział czasu występowania polaryzacji anodowej, co w normie PN-EN 50162 uznane jest za jeden ze sposobów określania poprawności pracy ochrony przed prądami błądzącymi.

Regulacja zwykłego drenażu polaryzowanego może odbywać się wyłącznie poprzez zmianę załączonych w obwodzie rezystorów regulacyjnych. Niestety jest to czynność wysoce kłopotliwa w typowych wykonaniach tego rodzaju urządzeń, ponieważ wymaga ingerencji obsługi (przełączenie rezystorów), a następnie wykonanie odpowiednich pomiarów kontrolnych – całodobowych wg PN-EN 50162 lub odpowiednio skróconych. Drenaż polaryzowany nie ma ogranicznika prądu – przetężenie w obwodzie powoduje przepalenie bezpiecznika lub zadziałanie odpowiedniego wyłącznika. W obu przypadkach oznacza to przerwę w pracy drenażu.

### 3. Drenáže polaryzowane sterowane

Niedogodności opisanego wyżej drenażu polaryzowanego nie ma tzw. drenaż sterowany, wyłączany lub regulowany. Nazwy te nie są ugruntowane w nazewnictwie techniki ochrony katodowej, ponieważ dotyczą drenażu polaryzowanego (w obwodzie drenażowym znajduje się element przewodzący prąd jednokierunkowo), z tą jednak różnicą, że zamiast diody zastosowany został w nim polowy tranzystor mocy typu MOSFET [11]. Ogólny poglądowy schemat takiego drenażu przedstawiono na rys. 4.

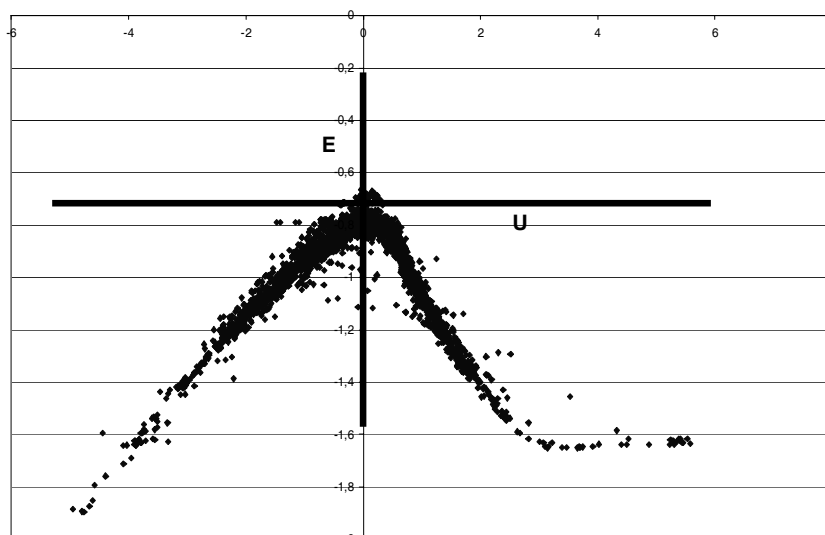


Rys. 4. Poglądowy schemat drenażu polaryzowanego sterowanego (regulowanego)

Zabieg ten umożliwił zmniejszenie niemal do zera progu zadziałania tego elementu w kierunku przewodzenia oraz – poprzez kluczowanie impulsowe tranzystora – pozwolił na regulację prądu w obwodzie drenażu. W efekcie pojawiła się nowa możliwość zmiany pozornej rezystancji obwodu drenażowego, co w rezultacie umożliwia swobodne elektroniczne kształtowanie charakterystyki drenażu poprzez odpowiednie sterowanie stopniem wypełnie-

nia impulsów prądowych. Urządzenia tego typu dostępne są na rynku [12,13], zaopatrzone są w ograniczniki maksymalnego prądu drenażu oraz regulatory potencjału.

Na rys. 5 przedstawione jest przykładowe widmo korelacji uzyskane dla drenażu sterowanego z regulowanym progiem maksymalnej polaryzacji (potencjału) chronionego obiektu. W III ćwiartce układu współrzędnych widoczne jest oddziaływanie prądów błędzących, które wywołują na zabezpieczanym obiekcie efekt ochronny (polaryzacja katodowa). Ta część widma w zasadzie nie zależy od rodzaju zastosowanego drenażu polaryzowanego. Natomiast zasadnicze zmiany w widmie ilustrującym pracę drenażu sterowanego widoczne są w ćwiartce I i IV - stromy wycinek widma w IV ćwiartce układu oraz praktycznie brak polaryzacji anodowej zabezpieczanego obiektu (brak widocznych punktów pomiarowych w I ćwiartce układu współrzędnych). Z widma można także zorientować się, że drenaż posiadał dość dużą wydajność prądową (elementy prostujące dużej mocy), ponieważ nie widać na nim pracy ogranicznika natężenia prądu w obwodzie ochrony. Wartością regulowaną drenażu był potencjał, co uwidocznione jest poziomo przebiegającym widmem korelacyjnym w IV ćwiartce układu. Oznacza to, że niezależnie od zmieniających się w określonym zakresie parametrów (napięcie, natężenie prądu drenowanego) urządzenie było zdolne utrzymać na chronionym obiekcie stałą wartość potencjału, a ściślej – mniej ujemną od nastawionej wartości granicznej. Taki rodzaj regulacji zabezpiecza chronioną konstrukcję przed nadmierną polaryzacją katodową, którą może wywołać drenaż o bardzo niskiej rezystancji.

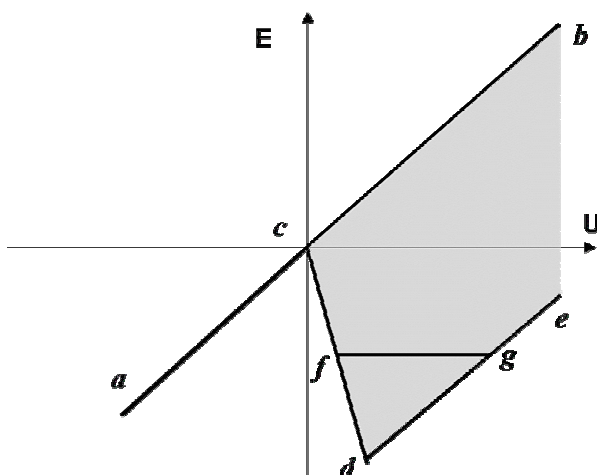


Rys. 5. Widmo korelacyjne drenażu regulowanego  
– w IV ćwiartce widoczne zagięcie widma – utrzymanie stałego progu potencjału

W zależności od przyjętego sposobu regulacji widma korelacji  $e=f(u)$  mogą dla drenażu regulowanego przybierać różną postać – typowe z nich zaprezentowano na rys. 6.

Dla uproszczenia na rys. 6. charakterystyczne fragmenty widma zastąpione zostały odcinkami linii prostych, zaś ich znaczenie i rolę, jaką odgrywają w pracy drenażu, przedsta-

wiono w podpisie do rysunku. Na rys. 7. przedstawiono ogólny schemat blokowy jednego z możliwych rozwiązań technicznych drenażu sterowanego.

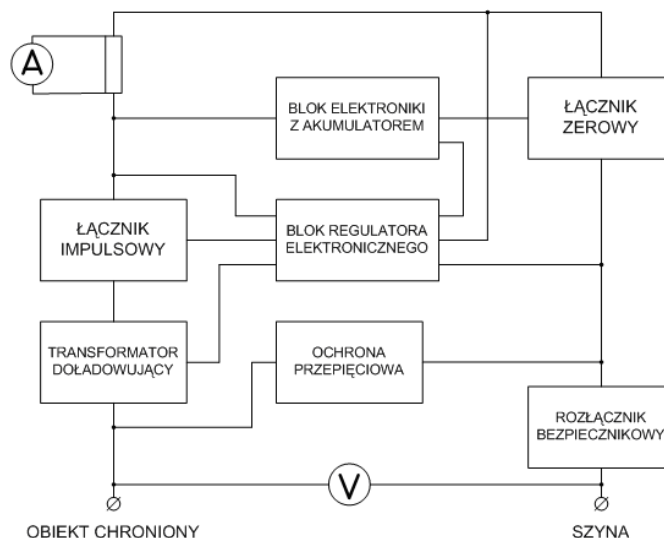


Rys. 6. Schematyczna ilustracja pracy drenażu polaryzowanego sterowanego:

- a – b* zależność korelacyjna potencjał konstrukcji – napięcie konstrukcji szyny dla miejsca posadowienia drenażu,
- c – b* odcinek zależności korelacyjnej odwzorowujący polaryzację anodową,
- a – c* odcinek zależności korelacyjnej niezależny od regulacji drenażu – polaryzacja katodowa wywołwana przez wpływający do konstrukcji prąd błądzący,
- c – d* odcinek zależności korelacyjnej będący wynikiem polaryzacji katodowej wywołanej przez drenaż przy pełnym wysterowaniu tranzystorów (przy najniższej rezystancji drenażu),
- d – e* odcinek zależności korelacyjnej będący wynikiem działania ogranicznika prądu drenowanego; albo maksymalnego prądu drenażu, albo wartości celowo sterowanej w celu uzyskania określonego efektu,
- f – g* odcinek zależności korelacyjnej odwzorowujący pracę drenażu przy regulowanej wartości progowej potencjału zabezpieczanej konstrukcji (jeśli występuje, to obszar *f – d – g* nie istnieje, a jeśli wartość tego progu jest bardziej ujemna niż potencjał odpowiadający punktowi *d*, to odcinek *f – g* nie występuje); odcinek *f – g* jest równoległy do osi napięcia i może znajdować się w całym obszarze regulacji oznaczonym kolorem szarym, w szczególności może pokrywać się z tą osią lub znajdować się w I ćwiartce układu współrzędnych.

W szczególności należy zauważyć, że polaryzowany drenaż sterowany umożliwia:

- praktycznie całkowite wyeliminowanie polaryzacji anodowej zabezpieczanej konstrukcji i przy wszystkich możliwych położeniach widma korelacji  $e=f(u)$  w układzie współrzędnych (w praktyce – we wszystkich przypadkach szkodliwego oddziaływania prądów błądzących), co zapewnia „łącznik zerowy” na rys. 7,
- możliwość swobodnego ograniczania płynącego w obwodzie drenażu prądu poprzez zmianę pozornej rezystancji drenażu, co może być wykorzystane do różnych celów sterowania automatycznego pracą drenażu, co zapewnia „łącznik impulsowy” na rys. 7.



Rys. 7. Schemat blokowy drenażu sterowanego [12].

Na rys. 6. kolorem szarym oznaczono wszystkie możliwe stany regulacji drenażu sterowanego, które mogą być osiągnięte w zależności od potrzeb wynikających z algorytmu regulacji. W dotychczasowej praktyce stosowania drenaży sterowanych wykorzystywano jedynie metody regulacji sprzętowej – nastawy ogranicznika prądu lub maksymalnego prądu drenowanego. Konsekwencją takiego rozwiązania technicznego jest przede wszystkim trudność w ocenie skuteczności ochrony przeciwkorozyjnej, brak powiązania z wymaganiami aktualnych w tym zakresie norm, a przede wszystkim konieczność prowadzenia każdorazowo czasochłonnych pomiarów celem ustalenia podstawowych parametrów pracy drenaży w strefach losowo-zmiennego oddziaływania prądów błędzących. Ostatecznie regulację drenaży prowadzi się metodą „prób i błędów”. W wielu znanych przypadkach działanie drenaży jest nadmiarowe, szczególnie w systemach wspólnych z instalacjami ochrony katodowej, kiedy mimo uzyskiwanych zadawalających rezultatów polaryzacji katodowej ze stacji ochrony katodowej, stosuje się drenaże elektryczne, które wymuszają dodatkowy przepływ znaczących prądów pomiędzy chronioną konstrukcją a ziemią.

Uzyskanie optymalnych i jednocześnie skutecznych warunków użytkowania urządzeń do eliminowania prądów błędzących wg normy PN-EN 50162, w szczególności drenaży elektrycznych, nie jest łatwe. Wymagania tej normy narzucają stosowanie jak najmniejszych prądów w obwodach drenażowych oraz określanych w warunkach długoterminowych parametrów eksploatacyjnych, zaś z drugiej strony do dyspozycji są różne urządzenia, którymi niestety takiej regulacji bez uciążliwych badań wykonać nie można.

#### 4. Inteligentnie sterowany drenaż polaryzowany – koncepcja

Zaprezentowane wyżej zalety drenażu polaryzowanego, wykorzystującego cechy tranzystorów MOSFET w charakterze elementów prostujących i sterujących prądem drenażu, mogą być jeszcze znacząco zwiększone poprzez włączenie do sterowania tego urządzenia techniki



mikroprocesorowej. Po zainstalowaniu drenażu w terenie, podłączeniu do niego przewodów drenujących do obwodów powrotnych trakcji elektrycznej oraz zabezpieczanej konstrukcji, a także stałej elektrody odniesienia do pomiaru potencjału tej konstrukcji, do tego urządzenia stale docierają bieżące sygnały charakteryzujące jego pracę w postaci zależności korelacyjnej  $e=f(u)$ , tzn. napięcie konstrukcja-szyny i potencjał konstrukcji, oraz aktualna wartość prądu drenażu. Sygnały te mogą być w urządzeniu w odpowiedni sposób analizowane celem wyboru optymalnej regulacji parametrów elektrycznych drenażu. Ten tok rozumowania doprowadził do powstania projektu, którego celem jest opracowanie i zrealizowanie praktyczne nowego układu sterowania polaryzowanego drenażu sterowanego, który spełni następujące główne założenia:

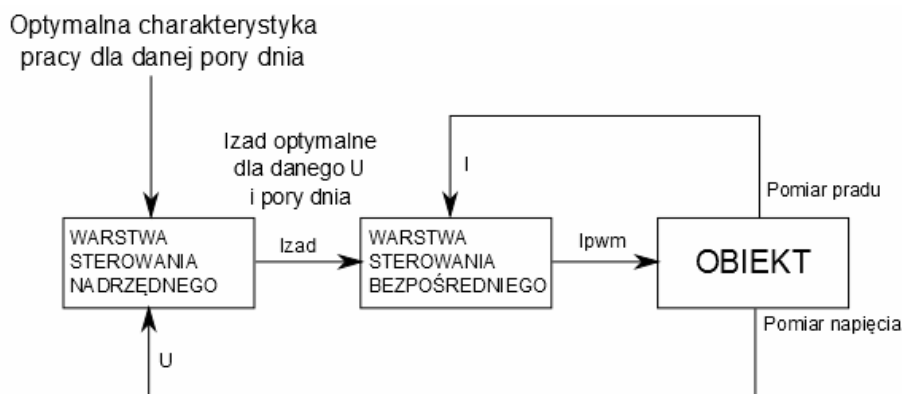
1. System sterowania na podstawie sygnałów pochodzących z instalacji ma obliczać sygnał sterujący drenażem, tzn. regulować wartość prądu płynącego w układzie. Oznacza to, że wartości wejściowe (napięcie, potencjał), jak i wartość sterująca (prąd) mają być ściśle określone i żadne sygnały dodatkowe nie są dostępne.
2. Sterowanie musi umożliwiać poprawne działanie urządzenia w dowolnym miejscu montażu w strefie oddziaływania prądów błędzących bez wcześniejszych pomiarów i wstępnej konfiguracji. Układ sterowania powinien sam dostosować się do obiektu sterowania.
3. Prąd drenażu musi być sterowany w sposób optymalny ze względu na odpowiednio zdefiniowane kryteria. Zdecydowano się na realizację takiego układu sterowania, który zapewniłby minimalizację prądu płynącego w układzie przy jednoczesnym spełnieniu wymagań w stosunku do zabezpieczenia przeciwkorozyjnego konstrukcji (ochrony katodowej) poprzez zapewnienie spełnienia odpowiednich wartości przyjętych wskaźników.

Główną trudnością, jaką stwarza omawiany problem regulacji, przy tak określonych założeniach, stanowi brak znajomości właściwości obiektu sterowania. Ponieważ założeniem projektowym jest to, aby opracowany algorytm sterowania działał w pełni poprawnie niezależnie od miejsca instalacji urządzenia, konieczna jest wcześniejsza identyfikacja parametrów otoczenia, w którym zamontowano drenaż. Nie jest znany również charakter oddziaływań, którym urządzenie ma przeciwdziałać, co prowadzi do konieczności dokładnego zbadania sygnałów mających wpływ na zachodzący proces celem określenia sposobu sterowania mogącego je kompensować. Oba z tych modeli – model obiektu sterowania (konstrukcja – drenaż – szyny) oraz model oddziaływań (prądów błędzących) – muszą być dostępne na potrzeby realizacji procesu sterowania drenażem. W związku z tym, konieczny jest ciągły pomiar występujących wielkości i ciągle uaktualnianie modeli w pamięci urządzenia w postaci charakterystyk lub zbioru parametrów. Olbrzymią pomocą jest tu dość dobrze opanowana technicznie metoda korelacyjnej analizy prądów błędzących, która dokładnie odpowiada poczynionym założeniom – w sposób bardzo przejrzysty odwzorowuje warunki pracy drenażu elektrycznego i jednocześnie charakteryzuje analizowany obiekt.

Zaprezentowane wyżej podejście pozwoli na stosowanie urządzenia bez prowadzenia długotrwałych badań obszaru, w którym ma zostać zamontowane, i jednocześnie zapewni, że dowolna zmiana parametrów układu, np. rozkładu jazdy tramwajów (tj. zmiana oddziaływań na obiekt), zostanie samoczynnie uwzględniona. Tłumaczy to potrzebę wykorzystania algorytmów identyfikacji i uzasadnia konieczność zastosowanie regulacji adaptacyjnej [14].

Drugim istotnym problemem sterowania drenażem jest kwestia optymalizacji. Proces optymalizacji w tym przypadku powinien być rozpatrywany dwuetapowo. Na podstawie modelu zmian oddziaływań w ciągu doby algorytm powinien określić wartości wskaźników regulacji adekwatnych do pory dnia. Ma to związek z tym, że istnieją okresy w ciągu doby

(np. godziny nocne, gdy ruch tramwajów/kolei jest wstrzymany lub ograniczony), w których oddziaływanie na obiekt jest znikome oraz okresy wzmożonej aktywności (np. godziny szczytu). Wydaje się oczywiste, że uwzględnienie tego faktu doprowadzi do bardziej optymalnej regulacji niż posługiwanie się wskaźnikiem „średniodobowym”, który z konieczności wskazywany jest jako uśredniona miara oddziaływań prądów błądzących [7]. Drugim etapem optymalizacji jest określenie charakterystyki regulatora (regulator nieliniowy), która zapewni spełnienie wymagań dla określonej pory dnia. Schemat regulacji dwuetapowej przedstawiony został na rys. 8.



Rys. 8. Schemat dwuetapowej optymalizacji pracy regulatora.

Algorytm sterowania powinien składać się z trzech głównych warstw:

- 1) Optymalizacji sterowania z horyzontem 24 godzinnym pozwalającej na określenie, w jaki sposób kształtują się wskaźniki określające zagrożenie korozyjne w ciągu doby. Warstwa ta opracowuje trajektorię (przebieg w funkcji czasu pożądanych współczynników), która zapewnia pełną ochronę obiektu, przy jednoczesnej minimalizacji czynników niepożądanych (np. zbyt dużych prądów). Opracowany przez tę warstwę przebieg wybranych współczynników jest realizowany przez warstwę kolejną.
- 2) Krótkookresowa optymalizacja sterowania polegająca na takim ukształtowaniu charakterystyki realizowanej przez regulator, aby otrzymać współczynniki zgodne z tymi, które zostały obliczone przez poprzednią warstwę. Ponieważ urządzenie wykonawcze, w postaci drenażu sterowanego, pozwala na dowolne kształtowanie charakterystyki, możliwe jest obliczenie optymalnej charakterystyki regulatora.
- 3) Warstwa sterowania bezpośredniego na podstawie pomiaru wartości prądu koryguje wartość zadaną tak, aby rzeczywisty prąd w układzie odpowiadał optymalnemu prądowi obliczonemu przez warstwy wyższe.

Tak zrealizowana struktura systemu sterowania pozwala na bieżące kontrolowanie procesu przy jednoczesnym uwzględnieniu dobowych zmian oddziaływań w układzie. Wszystkie z wymienionych założeń i cech algorytmu sterowania drenażem wymagają istnienia części odpowiedzialnych za identyfikację, adaptację i optymalizację dla celów sterowania. Algorytmy te (wymagające maszynowego uczenia się) charakteryzują proponowane rozwiązanie jako

„inteligentne” (korzystające z metod inteligencji obliczeniowej), a całe urządzenie jako „inteligentnie sterowany drenaż”.

## 5. Podsumowanie

W opracowaniu przedstawiono nowatorską koncepcję sterowania pracą drenaży elektrycznych, której główną tezą jest zastosowanie takiej regulacji prądu wyjściowego, która automatycznie dostosowuje się do wielkości i charakteru prądów błądzących. Jest sprawą oczywistą, że zastosowanie takiego rozwiązania usprawni i zoptymalizuje tę technikę ochrony przeciwkorozyjnej poprzez wyeliminowanie błędów i niefachowej obsługi tych urządzeń.

Jako bazę wykorzystano polaryzowany drenaż sterowany, wykonany na bazie tranzystorów polowych mocy typu MOSFET. Regulacja prądu odbywać się ma poprzez odpowiednie kluczkowanie tranzystora, zaś funkcję regulatora spełni odpowiednio zaprogramowany mikrokontroler. Jego zadaniem będzie stały pomiar napięcia pomiędzy konstrukcją a szynami, prądu drenowanego oraz potencjału zabezpieczanego obiektu. Na podstawie ich korelacji oraz odpowiednich algorytmów regulacji następować będzie ciągłe kontrolowanie pracy drenażu w taki sposób, aby spełniane było optymalne kryterium zapewniające zabezpieczenie przeciwkorozyjne chronionego obiektu.

*Praca zrealizowana została w ramach Programu Innowacyjna Gospodarka POIG.01.04-22-004/11 „Opracowanie nowych rozwiązań z zakresu aktywnych zabezpieczeń przeciwkorozyjnych z wykorzystaniem ochrony katodowej” dofinansowanego przez Unię Europejską.*

## Literatura

- [1] Sokólski W., *Charakterystyki drenaży elektrycznych*, Materiały VI Krajowej Konferencji „Pomiary korozyjne w ochronie elektrochemicznej”, SEP, Jurata 2000, s. 151.
- [2] Juchniewicz R., Sokólski W., *Field Evaluation of a New Method to Determine Stray Current Corrosion Activity*, „NACE Materials Performance” 1985, vol. 24, nr 7, s. 26–28.
- [3] Sokólski W., *Prądy błądzące, nowe spojrzenie na kryteria ochrony przeciwkorozyjnej*, „Ochrona przed Korozją” 1995, nr 8, s. 173–176.
- [4] Sokólski W., *Ocena zagrożenia korozyjnego konstrukcji podziemnych wywołanego przez prądy błądzące*, „Ochrona przed Korozją” 1992, nr 7, s. 153–157.
- [5] Sokólski W., *Metoda korelacyjna badania prądów błądzących. Piętnaście lat doświadczeń*, Materiały IV Krajowa Konferencja Pomiary Korozyjne w Ochronie Elektrochemicznej, SEP, 1996, Jurata; „Ochrona przed Korozją” 1997, nr 5, s. 126–130.
- [6] Sokólski W., *Investigations of Correlation Dependencies of Stray Currents in Municipal Agglomeration*, EUROCORR 2000, London.
- [7] PN-EN 50162 Ochrona przed korozją powodowaną przez prądy błądzące z układów prądu stałego.
- [8] PN-66/E-05024 Ochrona podziemnych urządzeń metalowych przed korozją powodowaną prądami błądzącymi. Wymagania i badania techniczne. Ministerstwo Komunikacji.
- [9] PN-90/E/05030.00 Ochrona przed korozją. Elektrochemiczna ochrona katodowa. Wymagania i badania.
- [10] PN-90/E-05030.01 Ochrona przed korozją. Elektrochemiczna ochrona katodowa. Metalowe konstrukcje podziemne. Wymagania i badania.

- [11] Cíp J., *Skuteczność drenaży włączanych*, Materiały IX Krajowej Konferencji „Pomiary korozyjne w ochronie elektrochemicznej”, SEP, Zakopane 2006.
- [12] ATEKO Ostrawa – <http://www.ateko.info>.
- [13] VA elektronik, KPTEch Ostrawa – [http://www.vaelektronik.cz/epd\\_uvod.html](http://www.vaelektronik.cz/epd_uvod.html).
- [14] Sokólski P., *Implementacja krzepkich metod estymacji dla celów regulacji predykcyjnej typu MPC*, praca dyplomowa, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2011.