

Napęd elektryczny żaluzji szafy ekspresyjnej w organach piszczałkowych – projekt, realizacja, badania eksploatacyjne

Michał Raczyński

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Elektryczny, Katedra Inżynierii Systemów, Sygnałów i Elektroniki, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin

Streszczenie: Szafa ekspresyjna to ważna część organów piszczałkowych, umożliwiająca zmianę głośności dźwięku generowanego przez instrument. W artykule opisano proces zastąpienia pneumatycznego systemu sterującego żaluzją szafy ekspresyjnej, układem napędu elektrycznego. Przedstawione zostały założenia projektowe, koncepcja układu sterowania, praktyczna realizacja prototypu urządzenia i ostatecznie jego wstępne badania. Opisany system, po procesie optymalizacji pod kątem czynników krytycznych, zrealizowano z wykorzystaniem silnika krokowego z regulacją prądu opartą o modulację szerokości impulsów. Całością systemu (m.in. odczytywaniem pozycji pedału, pozycjonowaniem żaluzji, eliminacją drgań, obsługą sytuacji błędnych) steruje mikrokontroler 8-bitowy. Układ poddano ocenie zarówno pod kątem mierzalnych parametrów (głośność pracy, uzyskiwane przyspieszenia), jak i subiektywnych kryteriów podczas testów dokonanych przez organistów w Bazylice św. Jana Chrzyciela w Szczecinie, gdzie urządzenie zostało zainstalowane.

Słowa kluczowe: szafa ekspresyjna, napęd elektryczny, silnik krokowy, sterowanie w otwartej pętli sprzężenia zwrotnego, modulacja szerokości impulsów

1. Wprowadzenie

Zmiana głośności tonu generowanego przez pojedynczą piszczałkę w tradycyjnych organach piszczałkowych wiąże się z licznymi problemami. Najprostsze rozwiązania polegające na zmianie wartości ciśnienia powietrza tłoczonego do piszczałki powoduje niedopuszczalną modyfikację szeregu innych, subiektywnych parametrów dźwięku, takich jak barwa i wysokość oraz szybkość narastania i opadania amplitudy. Szczegółowy opis tych zagadnień można znaleźć w [1, 8]. Aby umożliwić granie utworów wymagających dużej dynamiki (lub w ujęciu subiektywnym – ekspresji), w organach stosuje się tzw. szafę ekspresyjną. Wynalazek ten w swojej pierwotnej formie zastosowany został po raz pierwszy przez hiszpańskiego konstruktora Jose Ehevarrię w XVI wieku [1]. Działanie tego prymitywnego urządzenia polegało na umieszczeniu piszczałki w skrzyni, której wieko mogło być otwierane i zamykane za pomocą dźwigni

nożnej. Powodowało to uzyskanie skokowej zmiany głośności. Konstrukcja szafy ekspresyjnej była przez następne stulecia udoskonalana (głównie przez brytyjskich, hiszpańskich, niemieckich i francuskich konstruktorów) i ostatecznie przybrała swoją współczesną formę [1, 8]. Zasada działania jest w dalszym ciągu dość prosta i polega na zamknięciu jednej z sekcji piszczałek organowych w drewnianej skrzyni (pomieszczeniu). W jej przedniej ścianie wykonany jest otwór, który można zamykać i otwierać za pomocą pedału (ang. *swell pedal*) znajdującego się przy manuałach. Zamykanie i otwieranie otworu jest najczęściej uzyskiwane przez użycie żaluzji (podobnej do żaluzji weneckiej). Ze względu na to, że głośność piszczałek, które znajdują się w otwartej szafie ekspresyjnej jest mniejsza niż takich samych piszczałek znajdujących się na zewnątrz, to umieszcza się w niej tylko jedną sekcję. Pozostałe piszczałki mogą pracować z pełną głośnością. O ile sama konstrukcja szafy i żaluzji nie sprawia większych problemów technicznych, to dość skomplikowany jest układ napędu żaluzji. Szafa ekspresyjna często położona jest w znacznej odległości od manuału, a sama żaluzja, w zależności od wersji, ma masę kilkudziesięciu kilogramów. Zatem zastosowanie w pełni mechanicznego układu zapewniającego płynne otwieranie i zamykanie żaluzji jest kłopotliwe. W związku z tym w drugiej połowie XIX wieku, zaczęto stosować układy pneumatyczne, a następnie elektropneumatyczne. Postęp w dziedzinie elektrotechniki oraz elektroniki i automatyki w XX wieku, pozwolił na zastosowanie

Autor korespondujący:

Michał Raczyński, rm23892@zut.edu.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 27.09.2017 r., przyjęty do druku 06.11.2017 r.



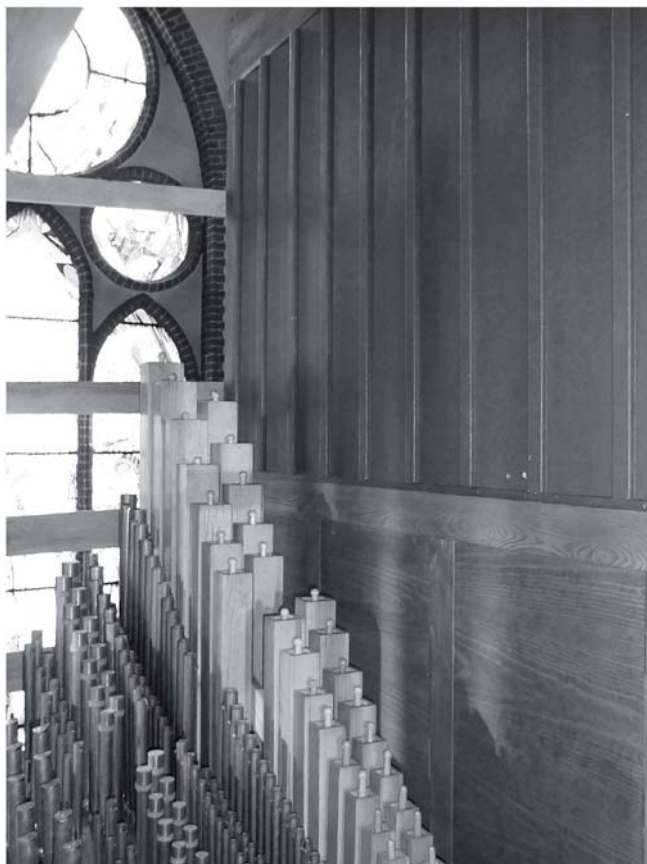
Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0

wyłącznie elektrycznego układu napędowego, niewymagającego tłoczenia powietrza i zapewniającego lepsze parametry użytkowe szafy ekspresyjnej [1]. Celem artykułu jest przedstawienie procesu projektowania, a następnie realizacji i testów prototypu układu napędowego z wykorzystaniem prostej, popularnej i taniej maszyny elektrycznej, jaką jest silnik krokowy. Jej sterowaniu poświęcona jest liczna literatura [2, 6].

2. Opis żaluzji szafy ekspresyjnej i pierwotnego rozwiązania układu napędowego

Żaluzja, dla której projektowano nowy układ napędowy składa się z dziewięciu prostokątnych elementów o wymiarach $1,46 \text{ m} \times 0,22 \text{ m} \times 0,04 \text{ m}$, wykonanych z płyty wiórowej. Dodatkowo krawędzie każdego elementu pokryte zostały materiałem zwiększającym szczelność w stanie zamknięcia. Oszacowana masa żaluzji (nie było możliwości dokładnego zważenia) to około 50 kg. Na rys. 1 zaprezentowano widok żaluzji z zewnątrz szafy ekspresyjnej.

W pierwotnym rozwiązaniu, działającym przez kilkadziesiąt lat, napęd żaluzji szafy ekspresyjnej był oparty na układzie elektro-pneumatycznym zawierającym miech, nadmuchiwany za pomocą pompy o napędzie elektrycznym, poruszający listwą drewnianą sprzęgniętą z żaluzją. Ruch posuwisty listwy odbywał się na odcinku 20 cm (od zamknięcia do pełnego otwarcia). Ten układ napędowy miał dwie zasadnicze wady. Po pierwsze nie była możliwa płynna regulacja położenia żaluzji, a jedynie skokowa, pozwalająca na ustawienie jej w pięciu dyskretnych pozycjach. Układ kontroli położenia pedału składał się z zestawu pięciu mechanicznych styków, zwierających się i rozwierających w zależności od położenia pedału. Po drugie, napęd nie zapewniał wystarczającej prędkości ruchu żaluzji. Czas peł-



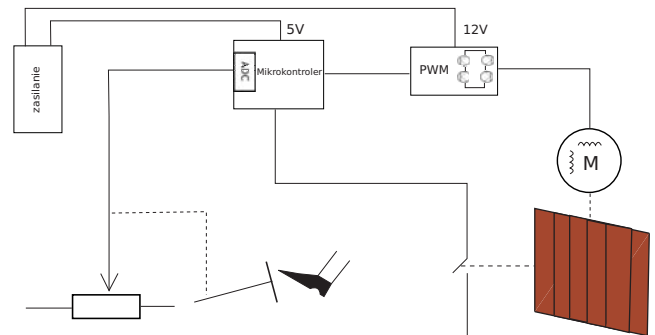
Rys. 1. Widok szafy ekspresyjnej
Fig. 1. A view of the swell box

nego otwarcia z pozycji zamkniętej to około 6 s. Okres ten był zdecydowanie za długi w przypadku konieczności zagrania fragmentu o szybkich i dużych zmianach głośności (tzw. *crescendo* lub *diminuendo*). Wymienione wyżej wady skłoniły do znalezienia nowego rozwiązania układu napędowego.

3. Założenia projektowe oraz ogólna koncepcja układu napędowego

Podstawowe założenia projektowe nowego urządzenia były następujące:

1. Płynna regulacja położenia żaluzji w zakresie od całkowitego otwarcia do zamknięcia;
2. Czas potrzebny na pełne otwarcie żaluzji z pozycji całkowitego zamknięcia (i odwrotnie) nie przekracza 1 s;
3. Hałas generowany przez całość systemu nie zakłóca pracy organów (pojęcie subiektywne oparte o indywidualne odczucia organisty);
4. Duża wytrzymałość systemu gwarantująca bezawaryjną pracę przez wiele lat. W razie wystąpienia uszkodzenia, możliwa szybka i tania naprawa urządzenia.



Rys. 2. Schemat blokowy systemu sterowania
Fig. 2. Block diagram of the control system

Płynna regulacja położenia pedału wymagała zastosowania przetwornika analogowo-cyfrowego. Spełnienie warunku 4. narzuciło konieczność zminimalizowania liczby elementów systemu i wykorzystania łatwo dostępnych i sprawdzonych podzespołów. W związku z tym zastosowano tani i bardzo popularny mikrokontroler AVR – ATmega8 z wbudowanym przetwornikiem analogowo-cyfrowym 10-bitowym. Rozpatrywano trzy potencjalne źródła napędu:

- silnik krokowy,
- serwomechanizm,
- silnik prądu stałego.

Silnik prądu stałego pozwala uzyskać duże prędkości obrotowe. Jego użycie nie pozwala jednak na precyzyjne sterowanie przesunięciem obiektu w otwartej pętli sprzężenia zwrotnego, a dodatkowe czujniki położenia komplikują całość układu. Aby uzyskać większą trwałość należałoby zamiast silnika komutatorowego zastosować silnik bezszczotkowy BLDC (ang. *Brushless Direct-Current Motor*), co również wpłynęłoby na komplikację układu sterowania. Z kolei zastosowanie serwomechanizmu łączyłoby się z koniecznością wykorzystania bardziej złożonego układu mechanicznego przeniesienia napędu. Jako optymalne rozwiązanie przyjęto użycie silnika krokowego umożliwiającego precyzyjne pozycjonowanie żaluzji w otwartej pętli sprzężenia zwrotnego i wymagającego jedynie prostego układu sterowania [2].

Ogólną koncepcję całości systemu przedstawiono na rys. 2. Zasilacz zapewnia dwa poziomy napięć: 5 V do zasilania części

mikroprocesorowej oraz 12 V dla układu wykonawczego. Pomiar pozycji pedału jest wykonywany za pomocą przetwornika A/C, mierzącego napięcie na potencjometrze, który jest mechanicznie połączony z pedałem. Układ regulacji prądu i podwójny mostek tranzystorowy typu H zasilający silnik krokowy zrealizowane są z wykorzystaniem dwóch układów scalonych (typu L297 i L298). Dodatkowym zabezpieczeniem i elementem zapewniającym wstępną kalibrację systemu po włączeniu zasilania jest wyłącznik krańcowy.

4. Układ kontroli prądu i zasilania silnika

Wybrany silnik krokowy, o symbolu SM 57/76-2008A, charakteryzuje się momentem trzymającym równym 2 Nm. Wyprowadzone przewody umożliwiają połączenie unipolarne lub bipolarne, z szeregową lub równoległą konfiguracją cewek. Przy zastosowanym połączeniu szeregowym bipolarnym indukcyjność jednego uzwojenia wynosi 14,4 mH, a rezystancja 4,5 Ω. Nominalne napięcie cewki wynosi w takiej konfiguracji 6,3 V, a prąd 1,4 A. Obracanie wału silnika krokowego uzyskuje się przez załączanie w odpowiedniej kolejności jego cewek do napięcia stałego, a więc podawanie na uzwojenia pewnej sekwencji skoków jednostkowych napięcia [2]. Równanie różniczkowe zwyczajne opisujące narastanie prądu w cewce po podaniu skoku jednostkowego napięcia przedstawione jest wzorem (1) [3].

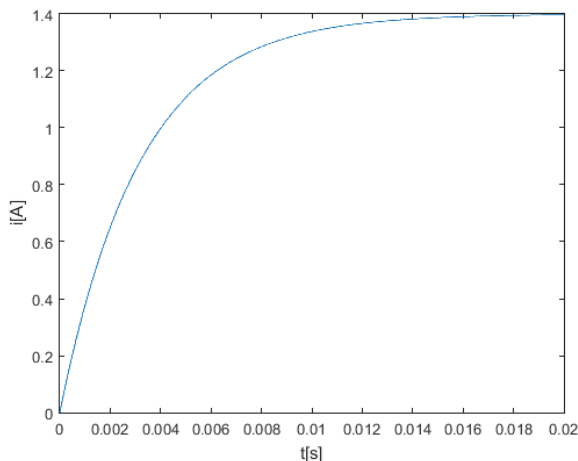
$$E = L \frac{di}{dt} + iR \tag{1}$$

gdzie: E – wartość napięcia załączonego do cewki, i – prąd w cewce, R – rezystancja cewki, L – indukcyjność cewki.

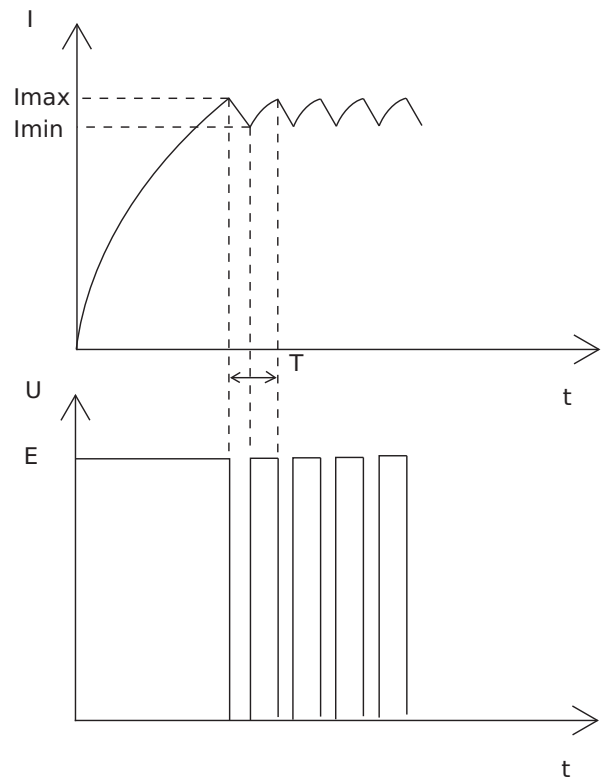
Rozwiązane analityczne równania (1) dane jest wzorem (2)

$$i = \frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right) \tag{2}$$

Po podstawieniu podanych wcześniej wartości napięcia, indukcyjności i rezystancji, otrzymamy funkcję narastania prądu w cewce przedstawioną na rys. 3. Eksperymenty wykazały, że aby osiągnąć wymagany moment obrotowy i w ten sposób zapewnić pewny i precyzyjny ruch żaluzji (bez gubienia kroków), prąd musi narosnąć do wartości około 1,0 A, co odpowiada czasowi 4,1 ms.



Rys. 3. Narastanie prądu w uzwojeniu silnika
Fig. 3. Current rising in the motor winding



Rys. 4. Przebiegi napięć i prądów przy sterowaniu PWM
Fig. 4. Current and voltage waveforms in the PWM control

Zastosowany układ mechaniczny (listwa zębata i współpracująca z nią zębata nałożona na wał silnika) wymaga wykonania przez silnik 635 kroków, aby osiągnąć pełne otwarcie żaluzji z pozycji zamkniętej. Zatem ruch taki trwałby około 2,54 s (nie uwzględniając czasu rozładowania prądu uzwojenia i wytworzonego przezeń pola magnetycznego), co nie spełnia założenia nr 2. Aby osiągnąć większy moment obrotowy przy większej prędkości obrotowej zastosowano układ regulacji prądu w uzwojeniu z wykorzystaniem sygnału PWM (ang. *Pulse Width Modulation* – modulacja szerokości impulsów). W tym celu użyto podwójnego mostka H opartego o układ L298 oraz współpracującego z nim układu L297, który zawiera w swojej strukturze generator sygnału PWM, dwa komparatory oraz układ generacji sekwencji sterującej silnikiem w trybie półkrokowym lub pełnokrokowym [7]. Wykorzystano jedynie tryb pełnokrokowy. Zrealizowanie układu regulacji prądu na zewnętrznych, dedykowanych układach pozwala z jednej strony zmniejszyć zapotrzebowanie na zasoby mikrokontrolera i dzięki temu wykorzystać prostszy i tańszy układ, a z drugiej – nie przeprowadzać zbyt komplikacji systemu. Sygnały sterujące dla układu L297 pochodzą z mikrokontrolera. Uproszczone przebiegi napięcia podawanego na cewkę silnika i prądu płynącego przez uzwojenia przedstawiono na rys. 4. Napięcie ma wartość maksymalną równą 12 V. W związku z tym prąd w cewce narasta szybciej niż przy napięciu nominalnym, a wymaganą wartość osiąga już po czasie 1,5 ms. Teoretyczny czas wykonania 635 kroków to około 0,95 s. Układ komparatorów, przerzutników, oraz generatora przebiegu prostokątnego, zawarty w układzie L297, dokonuje badania prądu uzwojeń i po przekroczeniu ustalonej wartości (I_{max}) powoduje wyłączenie napięcia i w konsekwencji rozpoczęcie zmniejszania się wartości prądu w cewce. Po pewnym czasie prąd osiąga wartość minimalną I_{min} , napięcie zostaje ponownie załączone, a prąd powtórnie zaczyna narastać. W ten sposób udaje się uzyskać większy moment obrotowy przy wyższych prędkościach obrotowych, a jednocześnie stabilizować prąd uzwojenia, wykluczając

przekroczenie bezpiecznej wartości (co mogłoby mieć miejsce przy niskich prędkościach obrotowych, a szczególnie zerowej prędkości obrotowej i korzystaniu z tzw. momentu trzymającego). Do pomiaru wartości prądu służą rezystory pomiarowe o wartości 0,5 Ω . W związku z tym we wzorze (2), za R należy podstawić sumę rezystancji uzwojenia i rezystora pomiarowego. Wartość maksymalna prądu wynosi 1,2 A.

5. Układ pozycjonowania żaluzji

Ruch żaluzji ma postępować za ruchem pedału poruszanego przez organistę. Potencjometr liniowy, suwakowy, o rezystancji 1 k Ω i zakresie przesuwu $L = 10$ cm, został sprzęgnięty mechanicznie z pedałem. Odczep potencjometru połączony jest z wejściem mikrokontrolera skonfigurowanym jako wejście przetwornika analogowo-cyfrowego. Krańcowe zaciski potencjometru podłączone zostały między napięcie referencyjne a masę za pośrednictwem rezystora o tak dobranej rezystancji, aby napięcie na potencjometrze wynosiło dokładnie 2,56 V, co odpowiada napięciu referencyjnemu wytwarzanemu przez wewnętrzny układ mikrokontrolera. Rozwiązanie to ma dodatkową zaletę polegającą na ograniczeniu prądu, który popłynąłby w przypadku zwarcia przewodów doprowadzających napięcie do potencjometru, do wartości około 1 mA. Dodatkowy kondensator blokujący ogranicza zakłócenia, które mogłyby indukować się w przewodzie o znacznej długości łączącym potencjometr z układem. Przetwornik A/C zawarty w mikrokontrolerze, będący układem opartym na metodzie sukcesywnej aproksymacji SAR (ang. *successive approximation register*), ma rozdzielczość 10 bitów [4]. W opisywanym zastosowaniu zupełnie wystarcza mniejsza rozdzielczość, którą eksperymentalnie dobrano na 7 bitów. Równanie (3) przedstawia dostępną liczbę kombinacji N . Rozdzielczość ta pozwala uzyskać rozróżnianie przesunięcia suwaka o wartość daną równaniem (4).

$$N = 2^7 = 128 \quad (3)$$

$$\Delta L = \frac{L}{N-1} = \frac{100 \text{ mm}}{127} = 0,79 \text{ mm} \quad (4)$$

Uwzględniając przekładnię otrzymujemy rozróżnienie skoku pedału o wartość 1,23 mm, co jest wartością odbieraną przez człowieka jako w zasadzie ciągła zmiana przesunięcia. Ograniczenie rozdzielczości przetwornika ma dodatkową zaletę w postaci ograniczenia wpływu zewnętrznych zakłóceń, a także umożliwia uproszczenie obliczeń, gdyż maksymalna liczba kroków jest wielokrotnością liczby 127. Zastosowany algorytm dokonuje pomiaru położenia pedału, obliczenia aktualnej pozycji żaluzji na podstawie liczby wykonanych kroków w kierunku lewym lub prawym oraz przesuwania żaluzji w kierunku pozycji zadanej. Ma on postać dyskretnego regulatora o nieliniowej charakterystyce. Klasyczny regulator PID opisany jest równaniem (5) [5]. Odpowiednio: $u(t)$ – odpowiedź regulatora, k – wzmocnienie, $\varepsilon(t)$ – uchyb regulacji, T_i – okres całkowania, T_p – okres różniczkowania.

$$u(t) = k \left[\varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau + T_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \right] \quad (5)$$

Po usunięciu członów różniczkującego i całkującego i dyskretyzacji czasu otrzymamy równanie (6).

$$u(n) = k\varepsilon(n) \quad (6)$$

gdzie n oznacza numer próbki. Dodatkowo zastosowano pętlę histerezy, aby wyeliminować pasożytnicze drgania silnika wywołane np. zakłóceniami indukującymi się na przewodzie łączącym przetwornik A/C z potencjometrem lub nieumyślnym, lekkim przesunięciem pedału podczas trzymania na nim nogi. Pętla histerezy powoduje, że charakterystyka zastosowanego regulatora jest nieliniowa. Równanie (7) opisuje jego ostateczną wersję.

$$u(n) = \begin{cases} 0, & \text{gdy: } 0 < |\varepsilon(n)| < \alpha \wedge \varepsilon(n-1) = 0 \\ -k \cdot \text{sgn}[\varepsilon(n)], & \text{w pozostałych przypadkach} \end{cases} \quad (7)$$

Praktyczne działanie regulatora opisanego równaniem (7) jest następujące. Odpowiedź jest niezerowa w dwóch przypadkach. Zawsze w przypadku, gdy wartość bezwzględna z bieżącego uchybu regulacji (zmierzonego w chwili n) jest większa od stałej α , której wartość ustalono doświadczalnie równą 2. Odpowiedź jest niezerowa także wtedy, gdy wartość bezwzględna uchybu regulacji jest większa od zera i mniejsza od stałej α , ale jednocześnie w poprzedniej, dyskretniej chwili $n-1$, wartość bezwzględna uchybu regulacji była niezerowa. Ponieważ stała k ma wartość 5, to niezerowa odpowiedź regulatora ma zawsze wartość -5 lub 5 , co odpowiada wykonaniu pięciu kroków w lewo lub w prawo. Obliczanie aktualnej pozycji, polegające na zliczaniu wykonanej liczby kroków w danym kierunku wymaga zastosowania wstępnej kalibracji, czyli ustalenia pozycji „0” po każdym uruchomieniu systemu. Służy do tego wyłącznik krańcowy. Algorytm startowy jest następujący. Po załączeniu zasilania, silnik krokowy rozpoczyna pracę, zamykając żaluzję z małą prędkością (co jest konieczne, aby nie uszkodzić wyłącznika krańcowego). Całkowite zamknięcie, ustalone jako umowna pozycja „0”, powoduje załączenie wyłącznika krańcowego i automatyczne zapisanie w pamięci RAM mikrokontrolera obecnej pozycji, jako równej 0. Od tego momentu aktualna pozycja żaluzji jest obliczana na podstawie wykonanej liczby kroków. Innym rozwiązaniem mogłoby być zastosowanie zapamiętywania aktualnej pozycji w pamięci nieulotnej EEPROM, jednak prosta procedura kalibracyjna z wykorzystaniem mechanicznego wyłącznika wydaje się być bardziej niezawodna. Dodatkowo, wyłącznik krańcowy umożliwia obsługę sytuacji błędnych, w przypadku, gdy z jakichś przyczyn silnik zostanie przeciążony, a w związku z tym zafalszowane zostanie obliczenie aktualnej pozycji. W przypadku, gdy wyłącznik krańcowy jest załączony, a obliczona pozycja jest niezerowa, algorytm dokonuje jej korekty. W przypadku gdy obliczona pozycja jest równa zero, a wyłącznik krańcowy nie jest załączony następuje automatyczne przesunięcie żaluzji do pozycji zamkniętej.

Rozpoczynanie ruchu przez żaluzję wymaga pokonania jej bezwładności i w przypadku gdy silnik usiłuje rozpocząć pracę z pełną prędkością obrotową, skutkuje przekroczeniem dopuszczalnego momentu obciążenia i zgubieniem kroków. Dodatkowym negatywnym zjawiskiem przy gwałtownym ruszaniu, jest generowanie znacznego hałasu. Aby ograniczyć powyższe problemy, wprowadzono prosty algorytm regulacji prędkości obrotowej. Polega on na wprowadzeniu dodatkowej funkcji opóźniającej odpowiadającej za wydłużenie czasu między wykonaniem kolejnych kroków przez silnik, która przyjmuje niezerowe wartości w początkowej fazie ruchu. Równanie (8) opisuje działanie tej funkcji.

$$d(m) = \begin{cases} 0, & m > \gamma \\ \delta \cdot m, & m \leq \gamma \end{cases} \quad (8)$$

gdzie: $d(m)$ – wartość funkcji opóźniającej, m – liczba (całkowita) kroków wykonanych od momentu ruszenia (m przyjmuje wartość zero w przypadku, gdy wartość funkcji $u(n)$ we wzorze

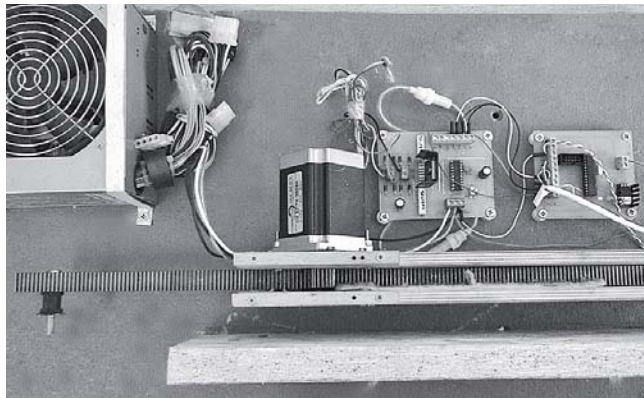
(7) jest zerowa, co oznacza, że żaluzja nie wykonuje ruchu), γ – stała dobrana eksperymentalnie ma wartość 20, δ – współczynnik proporcjonalności o wartości dobranej równej 2.

Wartość funkcji $d(m)$ oznacza liczbę dodatkowych, pustych obiegów pętli programu, zatem rzeczywisty czas opóźnienia, zależny jest od częstotliwości, z jaką jest taktowany mikrokontroler (w przypadku zrealizowanego prototypu częstotliwość taktowania wynosi 8 MHz).

6. Konstrukcja prototypu układu napędowego i testy funkcjonalności

Prototyp urządzenia wykonano z wykorzystaniem dwóch płytek drukowanych jednostronnych – jedna z układem mikrokontrolera, druga z układami odpowiadającymi za kontrolę prądu w uzwojeniach silnika. Wygląd urządzenia można zobaczyć na rys. 5, natomiast na rys. 6 przedstawiono prototyp w czasie testów eksploatacyjnych, po połączeniu z żaluzją.

Dostosowanie urządzenia do pracy polegało głównie na doborze maksymalnej prędkości obrotowej oraz parametrów funkcji opóźniającej w taki sposób, aby uzyskać możliwie najkrótszy czas otwierania i zamykania, wystarczający moment obrotowy silnika oraz najmniejszy hałas. Po optymalizacji pod kątem subiektywnych parametrów użytkowych ocenianych przez organistrza i organistę, dokonano pomiaru przyspieszeń występujących w systemie. W tym celu na listwie napędowej wykonującej ruch posuwisty, zainstalowano trzyosiowy akcelerometr analogowy, połączony z kartą akwizycji danych NI-PXI 4496. Zawiera ona przetworniki analogowo-cyfrowe o rozdzielczości 24 bitów



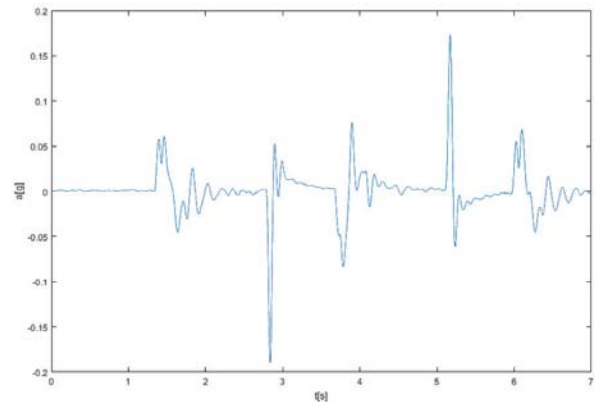
Rys. 5. Ogólny wygląd systemu napędowego
Fig. 5. General view of the electrical drive system



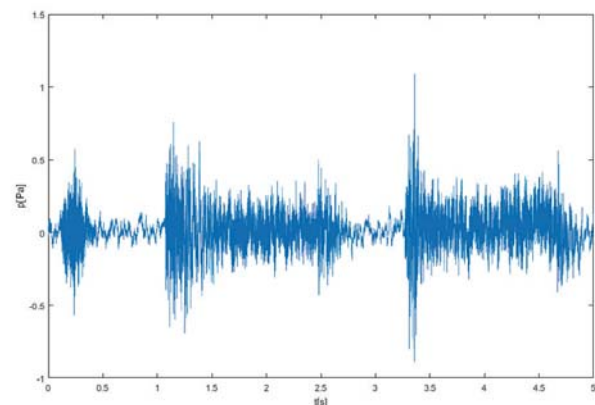
Rys. 6. System napędowy zainstalowany w szafie ekspresyjnej
Fig. 6. Electrical drive system installed in the swell box

i umożliwia rejestrację bardzo wolnozmiennych sygnałów (od 0,5 Hz). Za pomocą pedału, kilkakrotnie wykonywano całkowite zamykanie i otwieranie żaluzji. Zarejestrowane z częstotliwością próbkowania równą 20 kHz, wyniki z kanału odpowiadającego kierunkowi, w którym występuje ruch listwy, poddano obróbie w programie MATLAB, polegającej na filtracji dolnoprzepustowej filtrem Butterwortha 5. rzędu, o częstotliwości granicznej równej 10 Hz. Po uwzględnieniu czułości akcelerometru, wynoszącej 300 mV/g, na rys. 7 przedstawiono wykres zależności przyspieszenia od czasu.

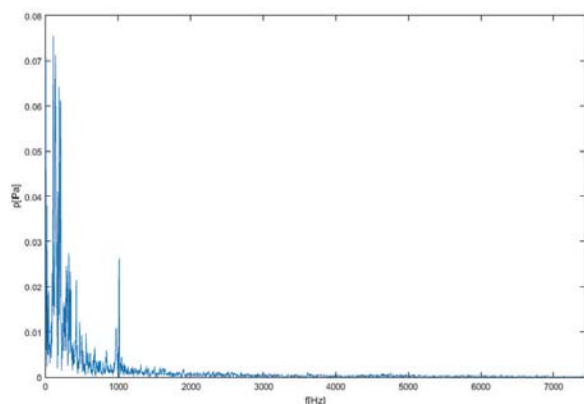
Wyraźnie można rozróżnić poszczególne fazy ruchu. Rozpoczęcie otwierania żaluzji następuje w chwili $t = 1,2$ s, następnie po około 1,4 s następuje zatrzymanie. Proces ponownego zamykania rozpoczyna się w chwili $t = 3,8$ s i trwa do chwili $t = 5,1$ s. Od tego momentu proces zamykania i otwierania się powtarza. Jak łatwo zauważyć, przyspieszenie w momencie rozpoczęcia ruchu jest znacznie mniejsze od przyspieszenia występującego w momencie zatrzymania. Jest to skutkiem zastosowanej funkcji opóźniającej, a także tego, że zrezygnowano z dodatkowego algorytmu hamowania. Jak pokazały testy, natychmiastowe zatrzymanie żaluzji nie powoduje przekroczenia dopuszczalnego momentu obciążenia. Jest to wynikiem istnienia momentu trzymającego w silniku krokowym. Kolejnym parametrem, którego pomiaru dokonano, jest głośność pracy. Do rejestracji sygnału ponownie wykorzystano kartę akwizycji danych oraz mikrofon pomiarowy typu MK250-SV12L, jego czułość określona jest na 50 mV/Pa. Częstotliwość próbkowania wynosiła 44,1 kHz. Ruch żaluzji miał taki sam charakter, jak podczas pomiaru przyspieszeń. Na rys. 8 przedstawiono zarejestrowany sygnał, bez jakiegokolwiek obróbki. Obliczona wartość średnia ciśnienia aku-



Rys. 7. Zależność przyspieszenia żaluzji od czasu
Fig. 7. Acceleration of the shutter as a function of time

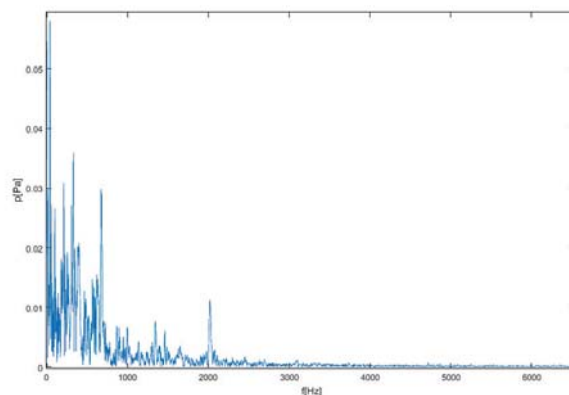


Rys. 8. Ciśnienie akustyczne w funkcji czasu podczas ruchu żaluzji
Fig. 8. Sound pressure level as a function of time during the movement of shutter



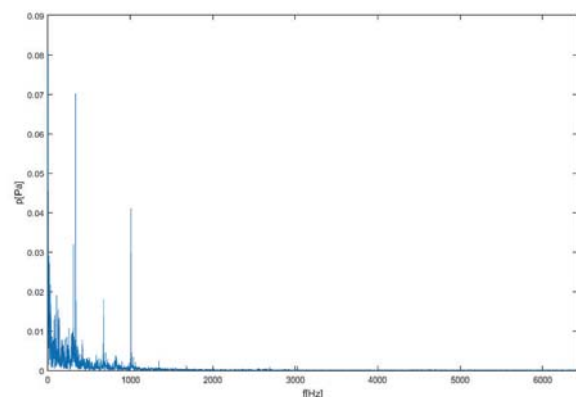
Rys. 9. Widmo ciśnienia akustycznego w fazie ruszania

Fig. 9. Spectrum of the sound pressure level in the phase of start the movement



Rys. 11. Widmo ciśnienia akustycznego w fazie hamowania

Fig. 11. Spectrum of the sound pressure level in the phase of braking



Rys. 10. Widmo ciśnienia akustycznego w fazie ruchu jednostajnego

Fig. 10. Spectrum of the sound pressure level in the phase of monotonous movement

stycznego wyniosła 78 dB. Taki poziom może wydawać się duży, jednak należy zauważyć, że pomiaru dokonano u wylotu szafy ekspresyjnej przy otwartych drzwiach.

Przeprowadzono także analizę częstotliwościową danych. Ponieważ charakter sygnału jest zupełnie różny podczas przyspieszania, ruchu jednostajnego i hamowania, to wykonano odrębne analizy FFT dla każdego z wymienionych etapów. Wyniki przedstawiono na rys. 9 (ruszanie), rys. 10 (ruch jednostajny) oraz rys. 11 (hamowanie).

Jak można zauważyć, etap ruszania odpowiada za powstawanie znacznej ilości składowych o niskich częstotliwościach, co jest logiczne, ponieważ rozpoczęcie ruchu przez żaluzję, mimo zastosowania funkcji opóźniającej, ma zawsze charakter zbliżony do impulsowego i powoduje pobudzenie całej konstrukcji mechanicznej do drgań. Z kolei w fazie ruchu jednostajnego wyraźnie można wyróżnić dwie składowe: w okolicach 340 Hz i 1 kHz. Składowa 1 kHz jest widoczna zarówno w fazie ruszania, jak i ruchu jednostajnego. Niestety częstotliwość ta leży w zakresie wysokiej czułości ucha ludzkiego, co jest niewątpliwie zjawiskiem negatywnym. W etapie zatrzymywania, ponownie występują znaczne zagęszczenie składowych niskoczęstotliwościowych, mają one jednak niższą amplitudę, nie pojawia się też składowa 1 kHz.

7. Wnioski

Zrealizowane urządzenie w większości spełnia postawione założenia. Uzyskany czas potrzebny na otwarcie żaluzji z pozycji zamkniętej wyniósł niecałe 1,4 s, przy założeniu 1,0 s. W większości przypadków (szczególnie przy utworach liturgicznych, które są grane najczęściej), wartość ta jest zupełnie wystarczająca. Podobnie wygląda kwestia głośności działania, która

przez część użytkowników była oceniana jako wystarczająco niska, inni wskazywali na konieczność jej obniżenia. Przeprowadzone testy subiektywne, stwierdziły użyteczność urządzenia w organach piszczałkowych. Zaprojektowany system napędowy został zainstalowany w Bazylice św. Jana Chrzciciela w Szczecinie, gdzie już od kilku miesięcy jest eksploatowany i działa bezawaryjnie. Dłuższy okres obserwacji pozwoli wyciągnąć pełniejsze wnioski co do bezawaryjności urządzenia. Dużą zaletą wykonanego napędu jest jego bardzo niska cena. Zrealizowany projekt wskazuje na możliwość stosowania silnika krokowego także w systemach napędowych, gdzie zależy nam na dużej precyzji pozycjonowania bez użycia zewnętrznych czujników, a jednocześnie nie są wymagane duże prędkości obrotowe.

Podziękowania

Autor wyraża podziękowanie Panu dr inż. Witoldowi Mickiewiczowi z Katedry Inżynierii Systemów, Sygnałów i Elektroniki na Wydziale Elektrycznym Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie za merytoryczną i praktyczną pomoc przy realizacji projektu. Autor dziękuje Panu Waldemarowi Wasilewskiemu, organmistrzowi odpowiedzialnemu za proces remontu organów i inicjatorowi powstania nowego układu napędowego. Podziękowania składa także Panu tech. Adamowi Bellerowi z Katedry Inżynierii Systemów, Sygnałów i Elektroniki na Wydziale Elektrycznym Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie za okazaną pomoc w pracach mechanicznych i elektrycznych.

Bibliografia

1. Bush D.E. (editor), Kassel R. (associate editor), *The Organ: An Encyclopedia*, New York, Routledge Taylor and Francis Group, 2006, ISBN-10: 0415941741.
2. Condit R. (Microchip Technology Inc.), Jones D.W. (University of Iowa), *Stepping Motors Fundamentals*, Microchip Technology Incorporated, 2004, AN907.
3. Lipiński W., *Podstawy Teorii Obwodów Elektronicznych* tom 1, Politechnika Szczecińska, Instytut Elektroniki i Informatyki, Szczecin, 1992.
4. ATmega8A DATASHEET COMPLETE, Atmel Corporation, San Jose, 2015.
5. Discrete PID Controller on tinyAVR and megaAVR devices, Application note, Atmel Corporation, San Jose, 2016.
6. Hopkins T., *Stepper motor driving*, Application note, STMicroelectronics, 2012, AN235.
7. *The L297 stepper motor controller*, Application note, STMicroelectronics, 2003, AN470.
8. Barnes W.H., *The Contemporary American Organ*, Alfred Music, 1995, ISBN-10: 0769242901.

Electrical drive for shutter of the swell box in pipe organs – project, realization, exploitation tests

Abstract: Swell box is the important element of the pipe organs. It allows for regulation of volume of sound generated by the instrument. The paper describes process of replacing the pneumatic control system of swell boxes shutter by the new electrical drive. The project assumptions, concept of electronic control system, practical realization of the prototype device and finally the preliminary tests of the new electrical drive are presented. Described system, after the process of optimization in crucial criteria, was realized using the stepper motor with current control method based on Pulse Width Modulation. Most of processes in the system, inter alia, reading the current position of pedal, positioning the shutter, handling the incorrect situations, are controlled by 8-bit microcontroller. Circuit had subjected to an examination from the point view of measurable parameters (obtained accelerations and level of noise). Then, the practical tests in the Basilica of St. John the Baptist in Szczecin (where the system has been installed) were conducted by organist.

Keywords: swell box, electrical drive, stepper motor, open loop positioning, PWM (Pulse Width Modulation)

mgr inż. Michał Raczyński

rm23892@zut.edu.pl

Absolwent Wydziału Elektrycznego Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Tytuł inżyniera w dyscyplinie elektronika i telekomunikacja uzyskał w 2015 r., tytuł magistra inżyniera w dyscyplinie elektrotechnika w 2016 r. Obecnie doktorant w Katedrze Inżynierii Systemów, Sygnałów i Elektroniki na Wydziale Elektrycznym Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Zainteresowania naukowe skupiają się wokół mikroprocesorowych systemów pomiarowych, metrologii akustycznej, metod numerycznych i przetwarzania sygnałów.



