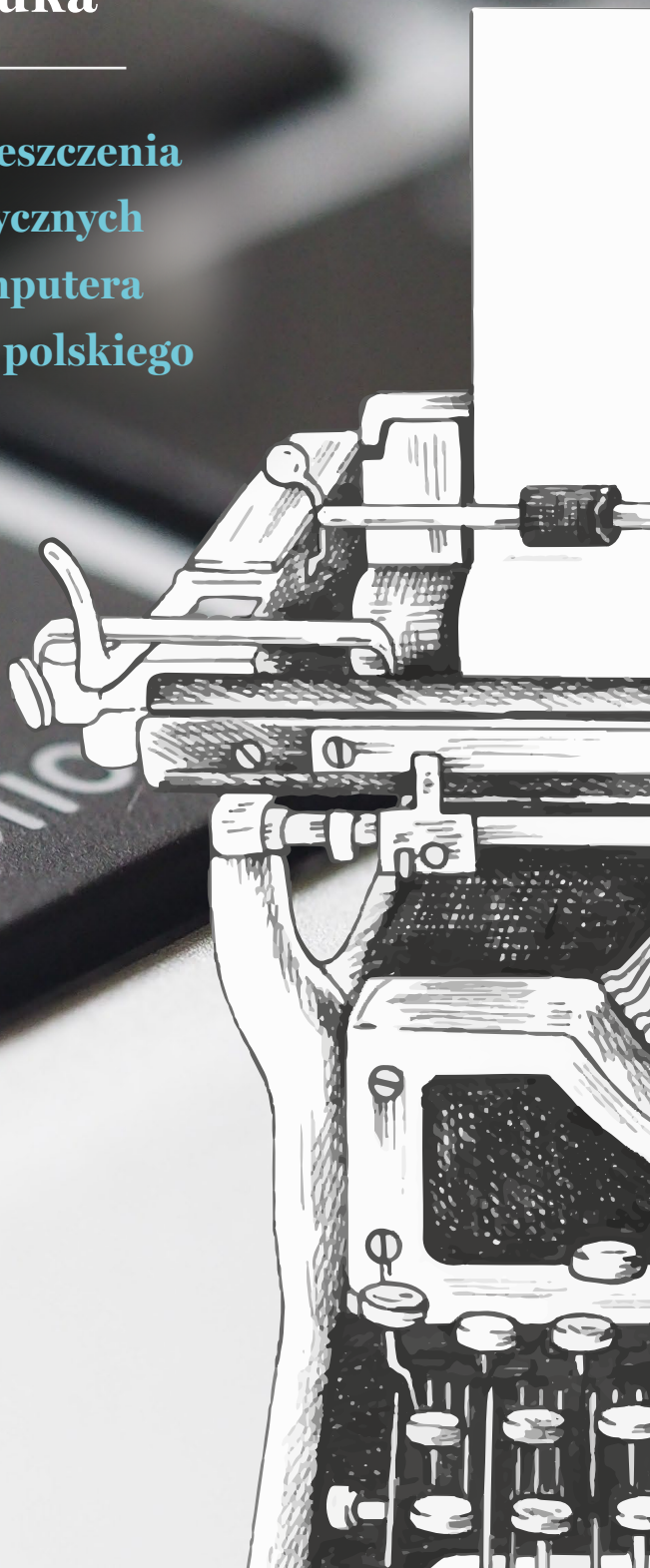


Radosław Puka

Optymalizacja rozmieszczenia
znaków alfanumerycznych
na klawiaturze komputera
na przykładzie języka polskiego



WYDAWNICTWA AGH
KRAKÓW 2023



Radosław Puka

**Optimalizacja rozmieszczenia
znaków alfanumerycznych
na klawiaturze komputera
na przykładzie języka polskiego**



WYDAWNICTWA AGH

KRAKÓW 2023

Wydawnictwa Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie

© Wydawnictwa AGH, Kraków 2023
ISBN 978-83-67427-36-4

Dyrektor Wydawnictw AGH: *Jan Sas*

Komitety Naukowe Wydawnictw AGH:
Marek Gorgoń (przewodniczący)
Barbara Gąciarz
Elżbieta Pamuła
Bogdan Sapiński
Stanisław Stryczek
Tadeusz Telejko

Afiliacja autora:
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

Recenzenci:
dr hab. inż. Joanna Duda, prof. AGH
dr hab. inż. Konrad Lewczuk, prof. PW

Redakcja: *Monika Filipek*

Skład komputerowy: *Andre*

Projekt okładki: *Alicja Pronobis*

Zdjęcie i grafika na okładce:
Pexels.com: Jess Bailey Designs
FreePick.com: Rawpixel.com

Wydawnictwa AGH
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
tel. 12 617 32 28, 12 636 40 38
e-mail: redakcja@wydawnictwoagh.pl
www.wydawnictwo.agh.edu.pl

Spis treści

Wprowadzenie	5
1. Charakterystyka klawiatur	7
1.1. Klasyfikacje klawiszy klawiatury	7
1.1.1. Podział klawiszy ze względu na pełnioną funkcję	9
1.1.2. Podział klawiszy na rzędy	10
1.1.3. Podział klawiszy na kolumny	10
1.1.4. Podział klawiszy ze względu na obsługujący je palec	11
1.2. Warstwy klawiatury	13
1.3. Przegląd układów klawiatur	15
1.4. Podsumowanie	62
2. Projekt badania empirycznego	64
2.1. Opis badania	65
2.1.1. Badanie ankietowe	65
2.1.2. Opis badania eksperymentalnego	66
2.1.3. Dobór tekstu eksperymentu	67
2.2. Podsumowanie	85
3. Wyniki badania empirycznego	86
3.1. Techniki wykorzystane w badaniu empirycznym	86
3.2. Charakterystyka uczestników badania	88
3.3. Analiza wyników eksperymentu	92
3.3.1. Algorytm weryfikacji poprawności wpisanych znaków	92
3.3.2. Metoda wyznaczenia częstości występowania znaków w języku polskim	98
3.3.3. Analiza wyników	102
3.4. Podsumowanie	108

4. Optymalizacja rozmieszczenia klawiszy	110
4.1. Model optymalizacji rozmieszczenia znaków	111
4.2. Implementacja modelu optymalizacji	114
4.3. Projekt układu klawiatury	127
4.4. Implementacja projektu układu klawiatury	130
4.5. Podsumowanie	132
Podsumowanie i wnioski	134
Załącznik nr 1: Częstość bigramów w języku polskim	141
Literatura	152

Wprowadzenie

Klawiatura jako narzędzie służące do wprowadzania znaków znalazła swoje pierwsze zastosowanie w maszynach do pisania, gdzie efektem wciśnięcia klawisza było otrzymanie na kartce papieru wizualnej reprezentacji wybranego znaku. Wraz z rozwojem techniki znajdowano dla niej nowe zastosowania, na przykład używano jej do wprowadzania treści depesz, a później – jako jednego z narzędzi do pracy z maszyną cyfrową. W tym czasie możliwości funkcjonalne klawiatury znacząco wzrosły: od urządzenia umożliwiającego jedynie zapis na papierze do jednego z głównych (obok myszki i ekranów dotykowych) narzędzi wykorzystywanych do komunikacji z komputerem. Pomimo ogromnych zmian, jakie zaszły zarówno w funkcjonowaniu, jak i budowie klawiatury, najpopularniejszy układ klawiatury, tzw. układ QWERTY, który został opracowany w XIX wieku przez Christophera Lathama Sholesa [Yasuoka, Yasuoka 2011], pozostał niemal taki sam. Od czasu powstania pierwszych maszyn do pisania proponowanych zostało wiele różnych układów klawiatur, z których najbardziej znanym jest układ Dvoraka opatentowany w 1936 roku [Dvorak, Dealey 1936]. Obydwa wspomniane układy (Dvoraka i QWERTY) zaprojektowane zostały z uwzględnieniem języka angielskiego. Pomimo powstania wielu alternatywnych dla QWERTY układów nie istnieje jeden przyjęty zbiór kryteriów służących optymalizacji rozmieszczenia znaków na klawiaturze. Autorzy różnych układów klawiatur korzystają głównie z kryteriów zawartych w pracy Dvoraka i Dealeya [1936], często modyfikując ich listę lub rozszerzając ją o własne propozycje. Nie ma jednak zgody co do wpływu poszczególnych kryteriów na szybkość i ergonomię pisania oraz liczbę popełnianych błędów, dlatego też celem pracy jest opracowanie modelu optymalizacji rozmieszczania znaków alfanumerycznych na klawiaturze pozwalającego uwzględnić specyfikę danego języka. W niniejszej monografii przedstawiono autorski model optymalizacji układu klawiatury dostosowanej do potrzeb języka polskiego oraz na podstawie przeprowadzonych badań zaproponowano nowy układ klawiatury o nazwie „PoLay”.

Monografia została podzielona na pięć rozdziałów. Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie do problematyki projektowania układów klawiatur. Zawarto w nim także

przegląd najpopularniejszych układów. Drugi rozdział zawiera opis przeprowadzonych badań empirycznych mających na celu zebranie danych, na podstawie których możliwe było wyznaczenie kryteriów modelu optymalizacji rozmieszczenia znaków na klawiaturze. Z kolei w rozdziale trzecim dokonano analizy zebranych danych. Ostatni, czwarty rozdział zawiera model optymalizacji rozmieszczenia znaków na klawiaturze. Zaprezentowano w nim także układ klawiatury zaprojektowany na podstawie tego modelu. Życzę czytelnikom przyjemnej i pouczającej lektury.

Autor

1. Charakterystyka klawiatur

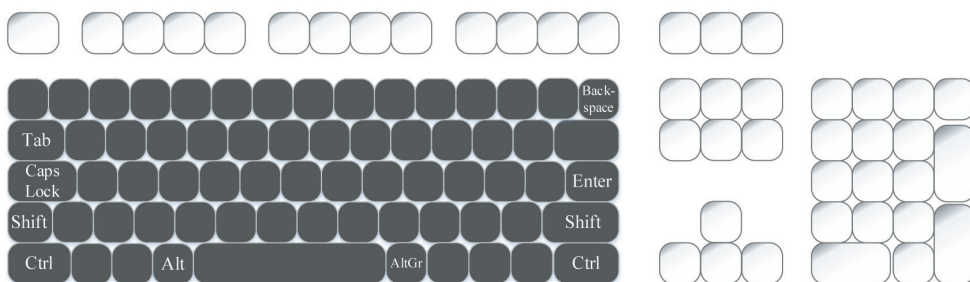
W niniejszym rozdziale poruszone zostaną między innymi takie kwestie jak:

- rodzaje klawiatur;
- pogrupowanie klawiszy w bloki, warstwy i rzędy;
- przypisanie klawiszy do palców dla pisanie bezwzrokowego wszystkimi palcami;
- przegląd dostępnych układów klawiatur.

1.1. Klasyfikacje klawiszy klawiatury

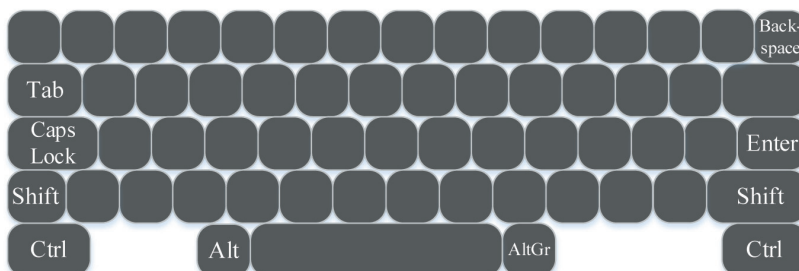
Współczesna klawiatura komputerowa może przyjmować wiele różnych form. Największe różnice w tym względzie można dostrzec pomiędzy klawiaturą np. laptopa (lub innych urządzeń mobilnych, jak netbook, notebook itp.), w którym jest ona zintegrowaną częścią urządzenia (a co za tym idzie – jej wielkość jest silnie zależna od wielkości urządzenia), a klawiaturą komputera stacjonarnego, w przypadku którego wybór odpowiedniego rodzaju klawiatury jest zależny od preferencji użytkownika. Fragmentem klawiatury, który w różnych urządzeniach przyjmuje zbliżoną formę, jest fragment zawierający klawisze znaków alfanumerycznych wraz z otaczającymi je klawiszami specjalnymi. W zależności od urządzenia pozostałe klawisze mogą zostać przemieszczone lub usunięte, jak dzieje się w przypadku niewielkich netbooków, których klawiatury zazwyczaj nie zawierają klawiszy bloku numerycznego (tzw. klawiatury numerycznej). Dlatego też, zdaniem autora, blok alfanumeryczny (rys. 1 i 2) stanowi kluczowy element klawiatury służący do komunikacji użytkownika z komputerem (m.in. ze względu na jego obecność także na klawiaturach komputerów przenośnych, czego nie można powiedzieć np. o bloku numerycznym) i dalsza część pracy poświęcona zostanie temu fragmentowi klawiatury.

Zaprezentowany na rysunku 1 schemat klawiatury uwzględnia klawisze opcjonalne w bloku alfanumerycznym. Na rysunku 2 przedstawiony został jedynie blok alfanumeryczny z pominięciem klawiszy opcjonalnych.



Rys. 1. Schemat klawiatury z wyróżnionymi ciemnym kolorem klawiszami bloku alfanumerycznego

Źródło: opracowanie własne na podstawie ISO/IEC 9995-2:2009



Rys. 2. Schemat klawiszy bloku alfanumerycznego z pominięciem klawiszy opcjonalnych

Źródło: opracowanie własne na podstawie ISO/IEC 9995-2:2009

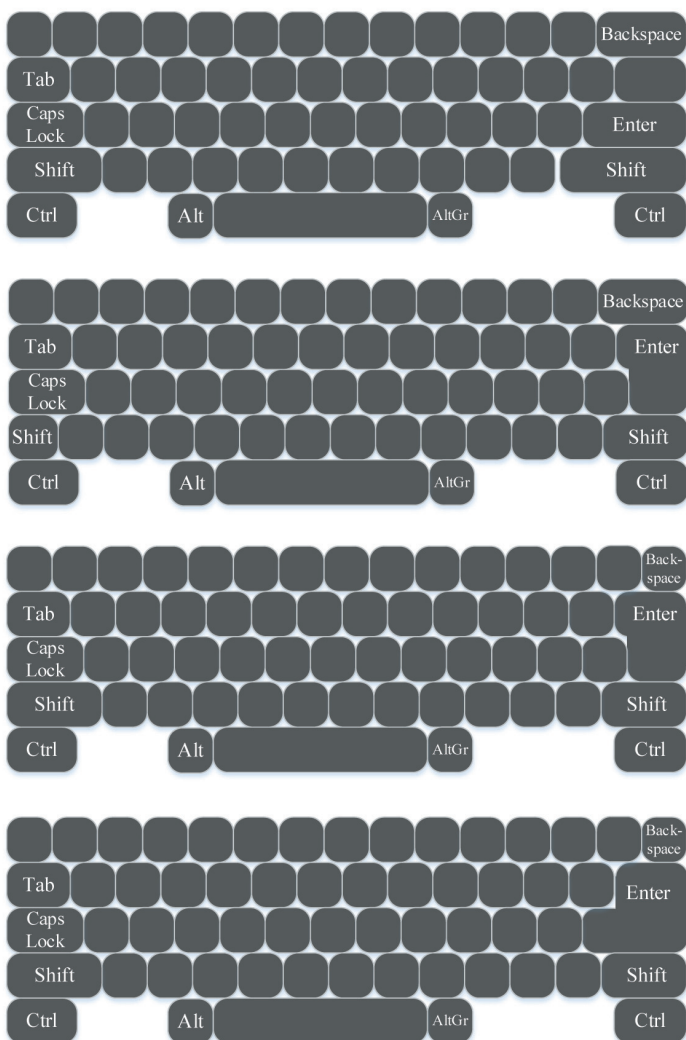
Pokazany na rysunku 2 schemat obrazuje uogólniony przypadek bloku alfanumerycznego zgodnego z ISO/IEC 9995-2:2009. Ponieważ istnieje kilka wersji tego fragmentu klawiatury, wspomniana norma dopuszcza modyfikacje polegające na powiększeniu określonego klawisza przez połączenie go z klawiszem sąsiadującym. Zmiany te dotyczą m.in.:

- klawisza Backspace (połączenie z klawiszem położonym po jego lewej stronie);
- klawiszy Shift (łączenie z klawiszami sąsiadującymi w poziomie);
- klawisza Enter (połączenie z klawiszem położonym bezpośrednio nad nim lub klawiszem umiejscowionym po jego lewej stronie).

Na rysunku 3 przedstawiono przykładowe układy, w których występują opisane modyfikacje.

Do zaprezentowania klasyfikacji klawiszy bloku alfanumerycznego wykorzystana została pierwsza z zaprezentowanych na rysunku 3 modyfikacji. Będzie ona traktowana jako domyślny układ bloku alfanumerycznego w dalszej części pracy.

Klawisze bloku alfanumerycznego można podzielić na grupy, m.in. w zależności od położenia oraz pełnionych funkcji. Istotne dla niniejszej pracy cztery podziały klawiszy zostały zaprezentowane w dalszej części pracy.



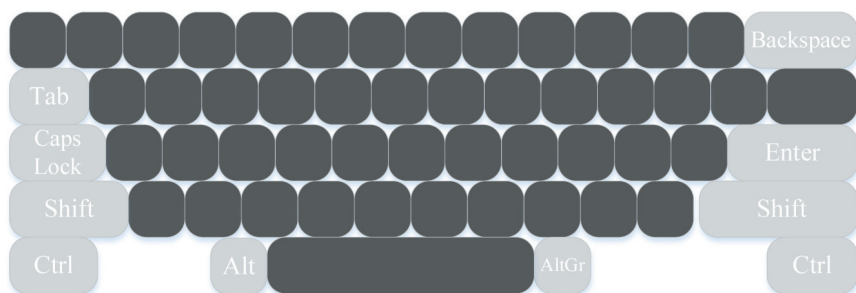
Rys. 3. Modyfikacje układu klawiszy zgodne z normą ISO/IEC 9995-2

1.1.1. Podział klawiszy ze względu na pełnioną funkcję

Klawisze bloku alfanumerycznego dzielą się na dwie grupy [ISO/IEC 9995-2:2009]:

1. klawisze alfanumeryczne – klawisze, które odpowiadają za wprowadzanie liter, znaków i symboli; do tej grupy jest zaliczana również spacja;
2. klawisze specjalne – klawisze umożliwiające m.in. dostęp do wszystkich warstw klawiatury, zatwierdzenie wykonywanej czynności czy usunięcie niepoprawnie wprowadzonych znaków.

Niniejszy podział klawiszy został zaprezentowany na rysunku 4.



Klawisze specjalne

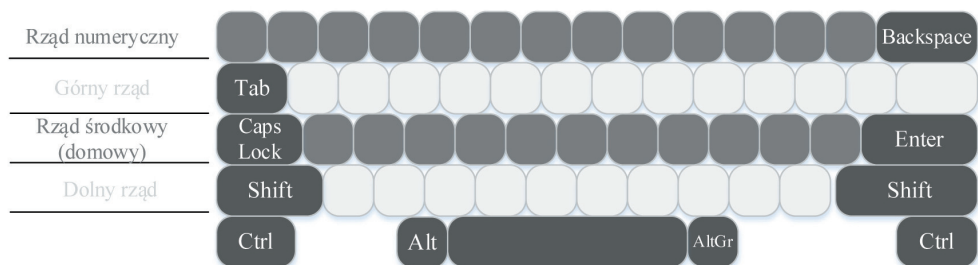


Klawisze alfanumeryczne

Rys. 4. Podział klawiszy bloku alfanumerycznego na klawisze specjalne i alfanumeryczne
Źródło: opracowanie własne na podstawie ISO/IEC 9995-2:2009

1.1.2. Podział klawiszy na rzędy

Klawisze alfanumeryczne można podzielić ze względu na rząd, w którym konkretny klawisz się znajduje. Pierwszy rząd od góry stanowi rząd numeryczny, w którym umiejscowione są cyfry. Pozostałe trzy rzędy noszą nazwy korelujące z ich położeniem na klawiaturze, przy założeniu, że rząd, w którym przy pisaniu bezwzrokowym palce mają swoje pozycje wyjściowe, jest rzędem środkowym (zwanym też rzędem domowym). Podział klawiatury na rzędy przedstawiony został na rysunku 5.

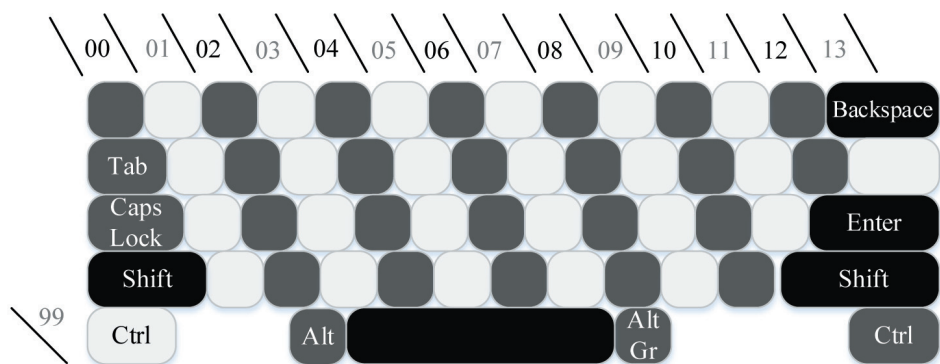


Rys. 5. Podział klawiszy alfanumerycznych na rzędy

1.1.3. Podział klawiszy na kolumny

Kolejna klasyfikacja dzieli klawisze ze względu na kolumnę, w której określony klawisz się znajduje. Ponieważ niektóre klawisze, jak na przykład Spacja czy Enter, są większe od pozostałych przycisków, nie można ich jednoznacznie przypisać do jed-

nej kolumny. Na rysunku 6 przedstawiono podział bloku alfanumerycznego na kolumny. Kolorem czarnym wyróżniono klawisze, które można zaliczyć do więcej niż jednej kolumny.

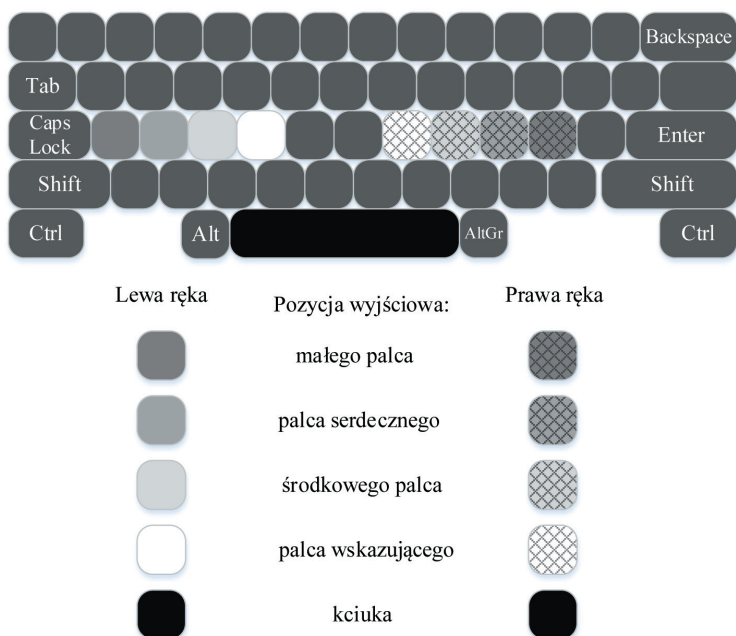


Rys. 6. Podział klawiszy alfanumerycznych na rzędy
Źródło: opracowanie własne na podstawie ISO/IEC 9995-2:2009

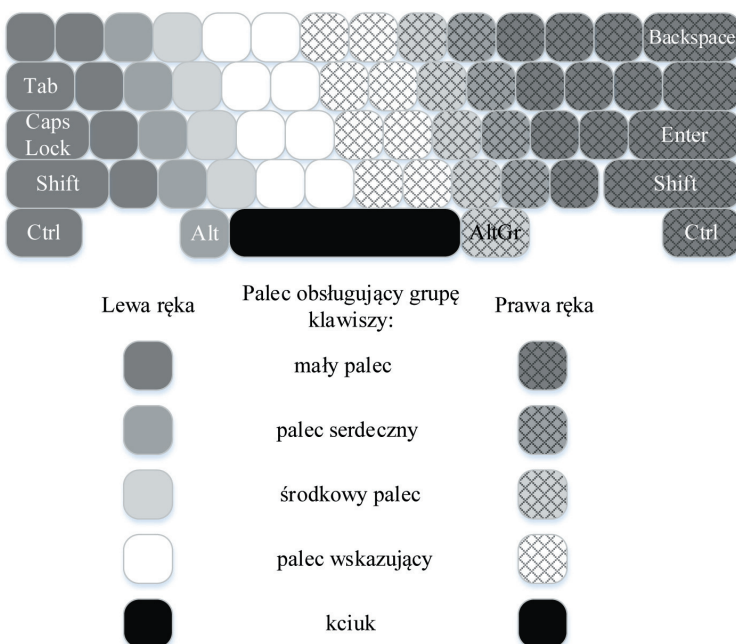
1.1.4. Podział klawiszy ze względu na obsługujący je palec

Zaprezentowana klasyfikacja klawiszy polega na przyporządkowaniu każdego z klawiszy (poza spacją, która może być obsługiwana przez obydwa kciuki) do jednego palca, który podczas pisania będzie odpowiadał za obsługę tego klawisza. Podział ten jest wykorzystywany przez osoby, które do pisania używają wszystkich palców. Służy on także do nauki pisania bezwzrokowego (bez spoglądania na klawiaturę w celu odnalezienia położenia danego klawisza). W celu ułatwienia pisania bezwzrokowego dwa klawisze stanowiące pozycję wyjściową dla palców wskazujących zostały zaopatrzone w wypustki, których zadaniem jest ułatwienie odnalezienia przez palce pozycji wyjściowej bez konieczności spoglądania na klawiaturę. Na klawiaturze z układem QWERTY klawisze te oznaczone są literami: „F” dla lewej ręki oraz „J” dla prawej ręki. Na rysunku 7 zaznaczono wykorzystywaną m.in. w pisaniu bezwzrokowym pozycję wyjściową palców.

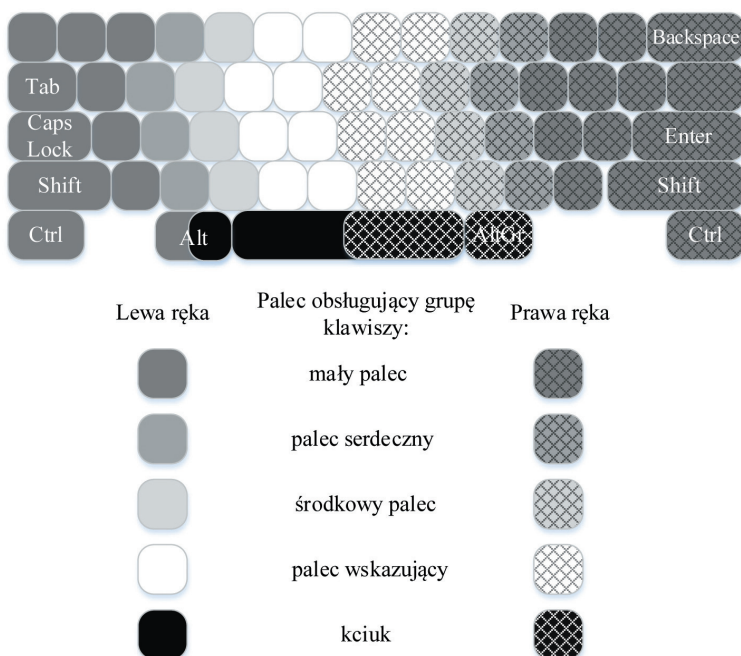
Podczas pisania bezwzrokowego każdy palec domyślnie obsługuje określoną grupę klawiszy. W literaturze występują różnice w przyporządkowaniu niektórych klawiszy do danej grupy (obsługującego palca). Na rysunkach 8 i 9 przedstawiono dwa przykłady różnego podziału klawiszy na grupy. Obydwa przyporządkowania zostały zaczerpnięte z programów służących do nauki pisania, przy czym drugie z przedstawionych rozwiązań ma swoje źródło w oprogramowaniu dostosowanym do potrzeb polskiego rynku. Może to mieć znaczenie ze względu na specyfikę języka polskiego, w przypadku którego występuje konieczność wykorzystywania klawisza AltGr w celu wpisywania znaków diakrytycznych niewystępujących np. w języku angielskim.



Rys. 7. Pozycje wyjściowe palców przy wykorzystaniu pisania bezwzrokowego
 Źródło: opracowanie własne na podstawie Giletech 2005



Rys. 8. Podział klawiszy ze względu na obsługujące je palce
 Źródło: opracowanie własne na podstawie Giletech 2005



Rys. 9. Alternatywny podział klawiszy ze względu na obsługujące je palce
 Źródło: opracowanie własne na podstawie NAHLIK SOFT 2014

Pomiędzy przedstawionymi podziałami klawiszy występują różnice w przyporządkowaniu klawiszy wiersza numerycznego oraz klawiszy funkcyjnych. W pierwszym przypadku (rys. 8) klawisze przyporządkowane zostały na podstawie kolumny, w której się znajdują – wyjątek stanowi spacja, która obsługiwana jest przez kciuki. Każda kolumna obsługiwana jest przez jeden palec, przy czym wyłącznie palec serdeczny i środkowy obsługują jedynie po jednej kolumnie. W przyporządkowaniu drugim (rys. 9) klawisze rzędu górnego, domowego i dolnego również są grupowane względem kolumny. W przypadku rzędu numerycznego występuje przesunięcie o jedną kolumnę w prawo, co powoduje zwiększenie liczby klawiszy obsługiwanych przez mały palec lewej ręki o jeden i tym samym – zmniejszenie liczności grupy klawiszy przyporządkowanych do małego palca prawej ręki o jeden. Różnice dotyczą także obsługi klawiszy Alt i AltGr, które w drugim przyporządkowaniu obsługiwane są odpowiednio kciukiem lub palcem serdecznym (Alt), względnie samym kciukiem (AltGr).

1.2. Warstwy klawiatury

Warstwa klawiatury to grupa znaków, jaką można otrzymać, pisząc na klawiaturze z użyciem danych klawiszy dostępu (kluczy). Pierwsze maszyny do pisania były

wyposażone w jedną warstwę – zawierały tylko wielkie litery. Później wprowadzono klawisz przełączania (odpowiednik obecnie występującego klawisza Shift) na małe litery, które stanowiły drugą warstwę. Kolejna warstwa to kombinacje znaków z klawiszem AltGr, za pomocą których otrzymywane są np. polskie litery diakrytyczne. Liczba warstw jest często podyktowana specyfiką języka, do którego układ jest przystosowany, a także rodzajem urządzenia, dla którego klawiatura została zaprojektowana.

W przypadku języków, w których nie występują litery diakrytyczne, liczba warstw może być ograniczona do dwóch, natomiast dla języków, w których występują takie litery, liczba warstw może wzrosnąć do czterech, przy czym w warstwach III i IV umiejscowione są małe i duże litery diakrytyczne. Przykładem takiego układu jest klawiatura polska – układ „Polski (programisty)”.

Drugą ważną determinantę liczby warstw stanowi rodzaj urządzenia, dla którego klawiatura jest przeznaczona. Maszyny do pisania, które były wyposażone jedynie w mechaniczny układ, zawierały jedną lub dwie warstwy. W przypadku klawiatury komputerowej nie występują ograniczenia co do maksymalnej liczby warstw (prócz liczby kombinacji klawiszy wykorzystywanych jako klawisze dostępu do kolejnych warstw). Przykładem może być klawiatura De-ergo, która została wyposażona w osiem warstw [Goebel 2000].

Poniżej przedstawione zostały cztery najczęściej występujące warstwy:

- I. znaki, które uzyskiwane są bez używania kombinacji klawiszowych (wciśnięcie określonego klawisza alfanumerycznego powoduje wprowadzenie znaku warstwy I);
- II. znaki otrzymywane za pomocą kombinacji klawisza specjalnego Shift z klawiszem alfanumerycznym;
- III. znaki otrzymywane z wykorzystaniem kombinacji klawisza specjalnego AltGr i klawisza alfanumerycznego;
- IV. znaki, do których dostęp można uzyskać przez kombinację klawiszy Shift + AltGr oraz klawisza alfanumerycznego.

Klawisze stanowiące modyfikatory dostępu (np. Shift dla warstwy II) mogą być zamieniane na inne w zależności od założonego przez autora układu celu, dla którego tworzony jest układ. Przykładem klawiatury, w której nastąpiła taka zmiana, jest układ NEO składający się z sześciu warstw [Neo-Layout 2014]. W celu umożliwienia dostępu do warstwy V i dalszych niezbędne jest dodanie dodatkowego klawisza lub klawiszy, które wykorzystywane będą jako dodatkowe klawisze specjalne. Ich kombinacja z pozostałymi klawiszami, stanowiącymi modyfikatory dostępu, umożliwi dostęp do dalszych warstw układu.

1.3. Przegląd układów klawiatur

Zaprezentowane w niniejszym podrozdziale układy zostały zaprojektowane na przestrzeni ostatnich trzech wieków (XIX, XX i XXI). Przeznaczone były do obsługi różnych urządzeń (m.in. maszyn do pisania i komputerów) i pisania w różnych językach. Stąd też może wynikać ich znaczne zróżnicowanie, zarówno pod względem formy (szczególnie widoczne w układach z XIX wieku), jak i metod rozmieszczenia znaków (np. na podstawie kolejności alfabetycznej lub tak, by minimalizować ilość ruchów palców).

Kolejność opisywanych w monografii układów jest następująca:

- QWERTY – jeden z najstarszych, a zarazem najpopularniejszych układów, który stanowi punkt wyjścia dla większości innych klawiatur;
- Dvorak – najpopularniejsza alternatywa dla układu QWERTY; wysunięte przez autorów tego układu tezy dotyczące optymalizacji rozmieszczenia klawiszy na klawiaturze są w dalszym ciągu wykorzystywane do budowy układów dostosowanych np. do specyfiki danego języka;
- układy przeznaczone dla języka polskiego.

Pozostałe układy, wymienione w porządku alfabetycznym, zostały omówione w dalszej części niniejszego rozdziału. Klawiatury, którym nie została nadana oficjalna nazwa, zostaną oznaczone za pomocą nazwy maszyny do pisania, w której układ wystąpił, lub nazwiska osoby, która zaprojektowała lub opatentowała dany układ. Układy, których rozmieszczenie znaków alfanumerycznych nie jest zgodne z normą ISO/IEC 9995-2:2009, zostaną zaprezentowane w dwóch wersjach:

1. oryginalnej – umiejscowienie klawiszy będzie tożsame z oryginalnym rozmieszczeniem zaproponowanym przez autora układu (które mogło być podyktowane np. specyfiką maszyny do pisania, na potrzeby której układ został stworzony);
2. znormalizowanej – rozmieszczenie znaków zostanie przez autora przeniesione na matrycę klawiatury zgodnej z normą ISO/IEC 9995-2:2009.

Do opisu klawiatur wykorzystano pojęcie bigramu, które należy rozumieć jako kombinację dwóch dowolnych znaków.

QWERTY

Nazwa układu pochodzi od pierwszych sześciu liter (licząc od lewej strony) znajdujących się na klawiszach umiejscowionych w górnym wierszu klawiatury. Jego historia sięga lat 70. XIX wieku [Yasuoka, Yasuoka 2011]. W 1872 roku zaprezentowano klawiaturę stanowiącą pierwowzór QWERTY, która po niewielkiej modyfikacji, pod nazwą „Sholes & Glidden”, została w 1873 roku wykorzystana w maszynie do pisania

[Sholes 1873; Yasuoka, Yasuoka 2011]. Rok później firma E. Remington & Sons zmieniła nazwę maszyny na „Serial No. 1”, jednocześnie przemieszczając literę „Y” bliżej środka górnego rzędu (rys. 10). Na uwagę zasługuje brak w układzie małych liter. Problem ten został rozwiązany w kolejnej wersji maszyny do pisania (Serial No. 2), powstałej w 1878 roku. Za przełączanie pomiędzy warstwami odpowiedzialne były przyciski Upper Case i Lower Case, które włączały odpowiednio I i II warstwę klawiatury (rys. 11).



Rys. 10. Układ klawiatury maszyny do pisania Serial No. 1

Źródło: opracowanie własne na podstawie Yasuoka, Yasuoka 2011



Rys. 11. Układ klawiatury maszyny do pisania Serial No. 2

Źródło: opracowanie własne na podstawie Yasuoka, Yasuoka 2011

Zarówno w klawiaturze maszyny Serial No. 1, jak i Serial No. 2 nie było klawiszy liczbowych „1” i „0”. Wynikało to z przekonania, że „1” można zastąpić literą „I”, natomiast „0” literą „O”. Inną istotną różnicą (w porównaniu z obecnym układem QWERTY) było położenie klawisza z literą „M” – znajdował się on w środkowym rzędzie obok litery „L”. Inaczej (odwrotnie) umiejscowione były także klawisze liter „X” i „C”.

Używany obecnie układ QWERTY powstał w 1882 roku. Został on stworzony przez firmę Wyckoff, Seamans & Benedict przez zmianę w rozmieszczeniu klawiszy w układzie klawiatury znanym z maszyny Serial No. 2. Celem tej modyfikacji było ominięcie patentu, jakim został objęty układ No. 2. Na rysunku 12 zaprezentowano zmieniony układ klawiszy z maszyny do pisania Serial No. 2. Wszystkie klawisze literowe są rozmieszczone analogicznie do współczesnego standardu QWERTY.



Rys. 12. Zmodyfikowany układ klawiatury maszyny do pisania Serial No. 2

Źródło: opracowanie własne na podstawie Yasuoka, Yasuoka 2011

Dostosowana do języka polskiego odmiana klawiatury QWERTY określana jest mianem „Polski (programisty)”. Układ ten wyposażony jest w polskie litery diakrytyczne, które umiejscowione są w III i IV warstwie klawiatury. Rozmieszczenie znaków w dwóch pierwszych warstwach nie zostało zmodyfikowane względem pierwowzoru (QWERTY). Na rysunku 13 zaprezentowano współczesny układ QWERTY.



Rys. 13. Współczesny układ QWERTY

Źródło: opracowanie własne na podstawie Microsoft 2014

Wykorzystywane w Europie klawiatury zgodne z normą ISO/IEC 9995-2:2009 nieznacznie się różnią od układu QWERTY. Poniżej zostały one opisane:

- QWERTZ – układ, w którym zamieniono miejscami litery „Y” i „Z”. Zgodnie z polską normą PN-I-06000:1997 (PN87) jest to układ obowiązujący w Polsce.
- AZERTY – klawiatura, w której zamienione zostały ze sobą miejscami (względem QWERTY) litery „A” i „Q” oraz „W” i „Z”. Przeszczynono także literę „M” (do rzędu środkowego, na prawo od litery „L”).
- QZERTY – modyfikacja QWERTY, w której odwrotnie rozmieszczone są litery „Z” i „W”. Także w tym układzie litera „M” została umieszczona obok litery „L”.

Klawiatura QWERTY (wraz z jej modyfikacjami) jest zgodna z normą ISO/IEC 9995-2:2009, co przyczynia się do popularności tego układu, jednocześnie utrudniając innym klawiaturom trafienie do szerszego grona odbiorców.

Układ Dvoraka

Nazwa układu pochodzi od nazwiska jednego z jego współtwórców – Augusta Dvoraka, który wraz ze swoim szwagrem, Williamem Dealeyem, w 1936 roku uzyskał patent na zgłoszony cztery lata wcześniej układ klawiatury (rys. 14) [Dvorak, Dealey 1936].



Rys. 14. Opatentowany w 1936 roku układ Dvoraka
Źródło: opracowanie własne na podstawie Dvorak, Dealey 1936

Optymalizując rozmieszczenie znaków na klawiaturze, Dvorak i Dealey przyjęli założenie, że domyślnym rzędem dla ułożenia palców będzie rząd środkowy. Autorzy wyznaczyli następujące cele optymalizacji [Dvorak, Dealey 1936]:

- minimalizacja czasu pisania;
- minimalizacja liczby popełnianych błędów;
- minimalizacja liczby ruchów, które zostały uznane za niekomfortowe;
- minimalizacja liczby ruchów, które zakłócają rytm pisania.

Na podstawie przeprowadzonych badań wyznaczone zostały następujące kryteria optymalizacji rozmieszczenia znaków na klawiaturze [Dvorak, Dealey 1936]:

- pisanie powinno odbywać się naprzemiennie obiema rękami;
- najczęściej występujące litery należy umieścić w rzędzie domowym;
- dwie kolejne litery nie powinny być pisane tym samym palcem;
- litery najrzadziej występujące powinny zostać umieszczone w dolnym rzędzie;
- jeżeli dwie kolejne litery pisane są jedną ręką, to powinny być umieszczone w jednym rzędzie (szczególnie należy unikać umieszczania ich w dwóch skrajnych rzędach), a wpisywanie takiej sekwencji ma przebiegać w kierunku palca wskazującego;
- prawa ręka uznana została za silniejszą, dlatego sekwencje liter, które nie są wpisywane przez obie ręce, powinny zostać przypisane do ręki prawej; obciążenie rzędu górnego i dolnego dla prawej ręki powinno być większe niż obciążenie analogicznych rzędów ręki lewej.

Dla osób leworęcznych Dvorak i Dealey proponują układ stanowiący lustrzane odbicie opatentowanej klawiatury, w której to lewa ręka jest bardziej obciążona pisaniem.

Obecnie używana klawiatura Dvoraka została zmodyfikowana względem oryginału m.in. przez przeniesienie litery „Z” na drugą stronę wiersza dolnego [Microsoft 2014]. Zmieniony układ zaprezentowano na rysunku 15.



Rys. 15. Współczesny układ klawiatury Dvoraka
Źródło: opracowanie własne na podstawie Microsoft 2014

Osoby, które nie mogą pisać obiema rękami, mają możliwość wykorzystania układu Dvoraka dostosowanego do pisania jedną ręką (powstały klawiatury dostosowane zarówno dla prawej, jak i lewej ręki).

Układ Kotasa

W tym przypadku nazwa również pochodzi od nazwiska autora – F. Kotasa [Zubrzycka 1963]. Jest to układ dostosowany do specyfiki języka polskiego. Według Kotasa klawiatura powinna zostać zoptymalizowana zgodnie z następującymi kryteriami:

- I. maksymalizacja naprzemienności pisania;
- II. maksymalizacja wykorzystania tego samego palca do wpisywania kolejnych znaków;
- III. maksymalizacja częstości wpisywania bigramów palcem środkowym i wskazującym;
- IV. minimalizacja częstości wpisywania bigramów palcem serdecznym i małym.

Kryteria optymalizacji Kotasa częściowo pokrywają się z kryteriami Dvoraka i Dealeya, jednak np. kryterium II jest do nich w opozycji. Na rysunku 16 przedstawiona została klawiatura Kotasa.



Rys. 16. Układ Kotasa

Źródło: opracowanie własne na podstawie Zubrzycka 1963

Układ „Polski międzynarodowy”

Układ ten został zaprojektowany przez Arkadiusza Robińskiego [Robiński 2007]. Klawiatura „Polski międzynarodowy” rozszerza układ QWERTY o dodatkowe warstwy, w których autor zamieścił m.in. znaki diakrytyczne języka niemieckiego i francuskiego, litery alfabetu greckiego czy symbole walutowe. Ponieważ warstwa I opisywanego układu jest analogiczna do QWERTY, rysunek ze schematem klawiatury „Polski międzynarodowy” został pominięty.

Polski układ uniwersalny

Polski układ uniwersalny został opublikowany w 1951 roku przez inżyniera T. Szeffela [Szeffel 1951]. Autor za główne kryterium rozmieszczania liter uznał wymuszanie naprzemienności pisania obiema rękami. W swoim projekcie Szeffel uwzględnił także m.in. takie kryteria jak dostosowanie obciążenia do sprawności palców oraz zgrupowanie samogłosek w środkowym rzędzie. Zaproponowany układ został przystosowany do języka polskiego, a przy jego projektowaniu autor uwzględnił statystyki częstości występowania poszczególnych liter w języku polskim. Na rysunku 17 zaprezentowano końcowy efekt prac Szeffela.



Rys. 17. Polski układ uniwersalny

Źródło: opracowanie własne na podstawie Szeffel 1951

Układ Zubrzyckiej

Klawiatura Ludomiły Zubrzyckiej została dostosowana do specyfiki języka polskiego [Zubrzycka 1963]. Autorka optymalizowała klawiaturę, m.in. dążąc do maksymalizacji naprzemienności pisania, a także maksymalizacji częstotliwości wykorzystania tego samego palca do wpisywania dwóch kolejnych liter (analogiczne kryterium występuje w przypadku układu Kotasa). Należy zauważyć, że drugi z wymienionych warunków stanowi zaprzeczenie jednego z kryteriów Dvoraka i Dealeya, zgodnie z którym kolejne znaki powinny być wpisywane przez różne palce. Na rysunku 18 przedstawiono układ zaproponowany przez Zubrzycką.



Rys. 18. Klawiatura Zubrzyckiej

Źródło: opracowanie własne na podstawie Zubrzycka 1963

Układy alfabetyczne

Rozmieszczenie znaków w kolejnym układzie odpowiada ich kolejności w alfabecie. Rozmieszczenie alfabetyczne było prawdopodobnie punktem wyjścia dla początkowych prac nad położeniem liter na klawiaturze, o czym może świadczyć jedna z pierwszych wersji klawiatur QWERTY (rys. 10), na której w rzędzie środkowym litery ułożone są w porządku zbliżonym do alfabetycznego („D”, „F”, „G”, „H”, „J”, „K”, „L”, „M”). Układy, w których rozmieszczenie liter opiera się na kolejności alfabetycznej, nadal cieszą się zainteresowaniem badaczy, o czym może świadczyć uzyskany w 2005 roku patent Ho Mun Sana (rys. 19) [San 2005].

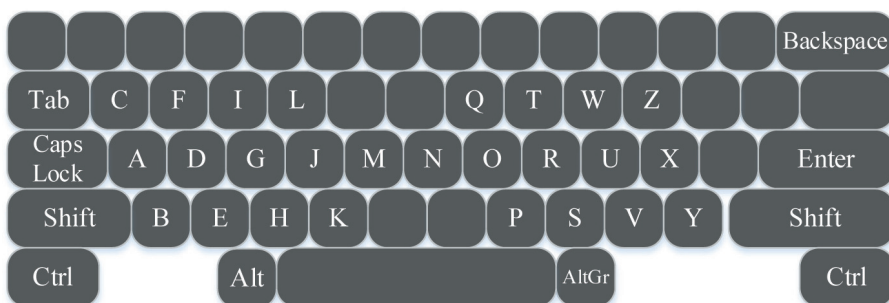


Rys. 19. Układ alfabetyczny autorstwa Ho Mun Sana

Źródło: opracowanie własne na podstawie San 1999

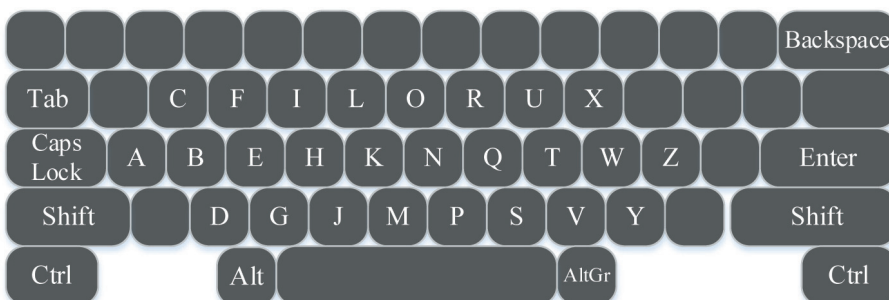
Opatentowany przez Sana układ był przedmiotem badań Nicolsona i Gardniera [1985]. W opublikowanej pracy autorzy przeprowadzili eksperyment, który udowodnił, że układ alfabetyczny może dawać lepsze rezultaty w szybkości pisania niż układ QWERTY.

Na podstawie porządku alfabetycznego powstały też m.in. układy opatentowane w 1985 roku przez Kathleen Gardner (rys. 20 i 21) [Gardner 1985].



Rys. 20. Pierwszy z układów wzorowanych na porządku alfabetycznym autorstwa Kathleen Gardner

Źródło: opracowanie własne na podstawie Gardner 1985



Rys. 21. Drugi z układów wzorowanych na porządku alfabetycznym autorstwa Kathleen Gardner

Źródło: opracowanie własne na podstawie Gardner 1983

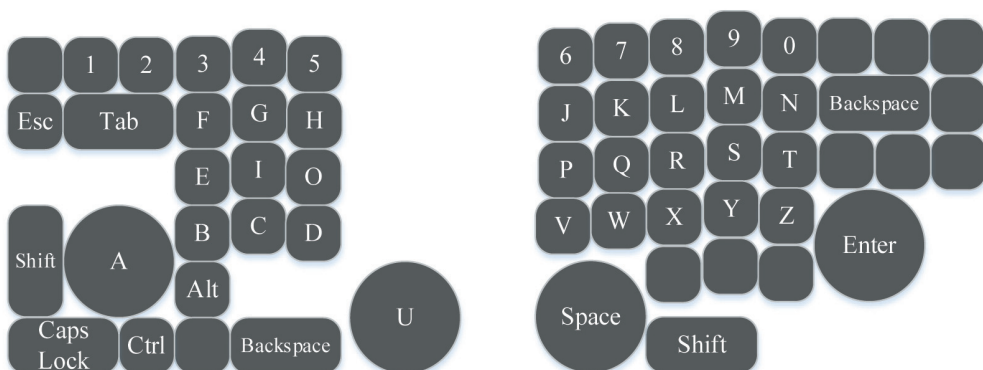
Kolejnymi układami zainspirowanymi porządkiem alfabetycznym są klawiatury opatentowane w 2000 roku przez Johna Parkinsona [Parkinson 2000]. Na rysunku 22 przedstawiony został jeden z opatentowanych układów. Na uwagę zasługuje zdublowanie liter „E” oraz „O”, dzięki czemu możliwe jest wpisywanie każdej z nich dowolną ręką.

Inną klawiaturą wykorzystującą porządek alfabetyczny jest klawiatura abKey [abKey 2004], której forma dalece różni się od klawiatury zgodnej z normą ISO/IEC 9995-2. Na rysunku 23 przedstawiono blok alfanumeryczny klawiatury abKey.



Rys. 22. Jeden z układów opatentowanych przez Johna Parkinsona

Źródło: opracowanie własne na podstawie Parkinson 2000



Rys. 23. Blok alfanumeryczny układu abKey

Źródło: opracowanie własne na podstawie abKey 2004

Amuseum

Opublikowana wersja układu Amuseum pochodzi z 2008 roku [Amuseum 2008]. Klawiatura dostosowana została do specyfiki języka angielskiego, ze szczególnym uwzględnieniem charakteru treści z zakresu IT oraz programowania. Na rysunku 24 zaprezentowano układ Amuseum.



Rys. 24. Układ Amuseum

Źródło: opracowanie własne na podstawie Amuseum 2004

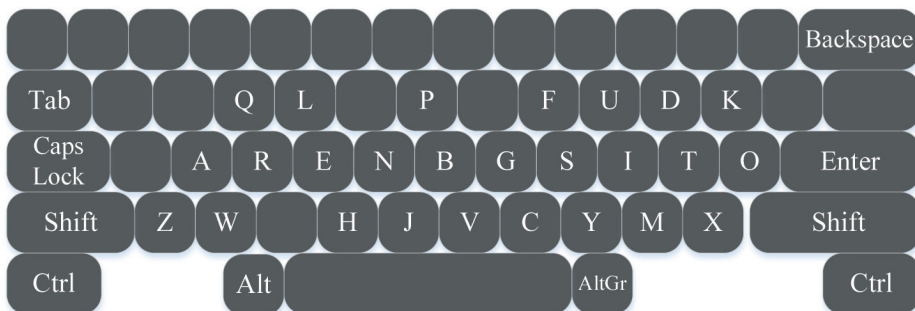
Arensito

Prace nad układem Arensito zostały zakończone 1 stycznia 2001 roku [Hallingstad 2001]. Autorem projektu jest Norweg Håkon Hallingstad. Klawiaturę przystosowano do specyfiki języka angielskiego. Nazwa układu powstała na podstawie ośmiu najczęściej występujących w języku angielskim liter [Hallingstad 2001], które zostały umieszczone w rzędzie domowym na pozycjach wyjściowych palców dla pisania bezwzrokowego. Na rysunku 25 zaprezentowano układ zaproponowany przez Hallingstada. Autor w bloku alfanumerycznym umieścił klawisze, które zgodnie z normą ISO/IEC 9995-2 powinny być rozmieszczone w innych częściach klawiatury. Zmieniono także położenie klawiszy funkcyjnych. Rysunek 26 przedstawia rozmieszczenie liter w układzie Arensito dostosowane do normy ISO/IEC 9995-2:2009.



Rys. 25. Układ Arensito

Źródło: opracowanie własne na podstawie Hallingstad 2001



Rys. 26. Układ Arensito dostosowany do wymogów normy ISO/IEC 9995-2

Armel

Autorem kolejnego układu jest Gerald Armel, który w 1999 roku uzyskał ochronę prawną swojego wynalazku [Armel 1999]. Zaproponowana przez Armela metoda rozmieszczenia znaków na klawiaturze różni się od wykorzystanej m.in. przez Dvoraka i Dealeya. Autor proponuje, aby kryterium rozmieszczania najczęściej występujących

znaków nie był wiersz, tylko palce, dlatego też najczęstsze litery nie zostały umieszczone jedynie w rzędzie domowym, ale także w rzędach górnym i dolnym. Zgrupowano je na klawiszach, które obsługiwane są przez palce wskazujące, a co za tym idzie – występują w środkowej części klawiatury. Na uwagę zasługuje fakt, że w układzie Armel dostęp do większości najczęściej występujących liter wymusza przesunięcie palca z pozycji wyjściowej. Klawiatura Armel została zaprezentowana na rysunku 27.



Rys. 27. Klawiatura Armel

Źródło: opracowanie własne na podstawie Armel 1999

Aser

Układ Aser został opatentowany w 1991 roku przez Harveya Romberga [Romberg 1991]. Stanowi on dostosowaną do języka angielskiego modyfikację klawiatury QWERTY, w której najczęściej wykorzystywane znaki zostały umiejscowione w rzędzie domowym. Autor zwraca uwagę na to, że większość wprowadzanych zmian dotyczy przesunięć liter na klawisze położone w bezpośrednim otoczeniu przycisku, na którym przed modyfikacją znajdowała się dana litera. Zdaniem Romberga ma to ułatwić korzystanie z układu Aser osobom, które wcześniej przyzwyczajone były do QWERTY. Na rysunkach 28 oraz 29 przedstawiony został opatentowany układ Aser oraz jego znormalizowana wersja.



Rys. 28. Układ Aser

Źródło: opracowanie własne na podstawie Romberg 1991



Rys. 29. Znormalizowany układ Aser

Źródło: opracowanie własne na podstawie Romberg 1991

ASSET

Zaprojektowany przez Davida Piepgrassa układ został dostosowany do specyfiki języka angielskiego [Piepgrass 2006]. Prace nad nim trwały przez ponad dwa lata i zakończyły się w 2006 roku. Klawiatura ASSET stanowi modyfikację QWERTY. Celem autora było wprowadzenie w układzie QWERTY możliwie małej liczby zmian, które mogłyby poprawić wydajność wykorzystania klawiatury (m.in. dzięki zmniejszeniu liczby ruchów palców). Kryteria optymalizacji rozmieszczenia znaków były analogiczne jak w przypadku układu Dvoraka z jedną różnicą – autor złagodził warunek dotyczący naprzemienności rąk na brzmiały następująco [Piepgrass 2006]: pisanie dwóch kolejnych znaków tą samą ręką jest dopuszczalne, pod warunkiem że są pisane przez palec wskazujący lub środkowy, a także że odpowiadające za wpisanie znaków klawisze nie są położone w skrajnych rzędach.

Dodatkowo Piepgrass wprowadził kryterium dotyczące klawiszy oznaczonych w układzie QWERTY literami „B” oraz „Y”, które uznano za trudno dostępne.

Interesującą zmianą wprowadzoną w układzie ASSET jest przeniesienie funkcji klawisza Caps Lock do warstwy II. W warstwie I przypisana została mu funkcja klawisza Backspace (rys. 30).



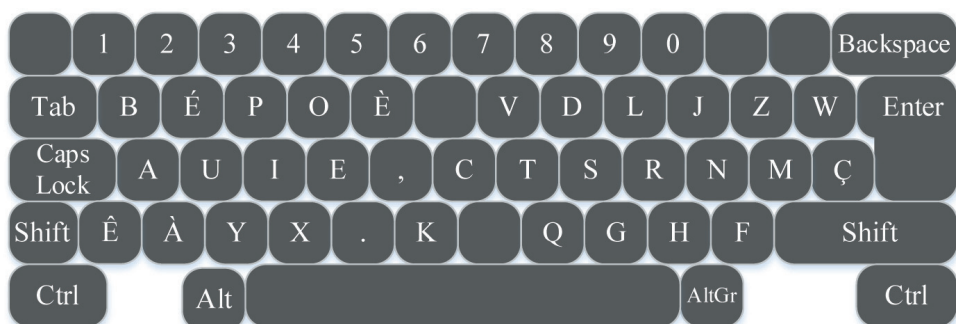
Rys. 30. Układ ASSET

Źródło: opracowanie własne na podstawie Piepgrass 2006

BÉPO

Projekt BÉPO został rozpoczęty w 2004 roku, kiedy to powstała wersja 0.1 układu [BÉPO 2004]. Może w nim wziąć udział każdy zainteresowany. Wiele z zaangażowanych w pracę osób wykorzystuje klawiaturę BÉPO w codziennej pracy, testując tym samym ergonomię rozmieszczenia liter w układzie i wyszukując jej słabe punkty. Klawiatura tworzona w ramach projektu przeznaczona jest dla osób piszących w języku francuskim. Obecna wersja układu uznana została za ostateczną, jednak osoby zaangażowane w projekt nadal pracują nad poprawieniem ergonomii układu.

Do optymalizacji rozmieszczenia znaków w BÉPO wykorzystano kryteria zaproponowane przez Dvoraka i Dealeya [1936]. Ze względu na występowanie w języku francuskim wielu znaków diakrytycznych wprowadzono dodatkowe kryterium, dotyczące rozmieszczenia znaków w warstwie III (i IV): ponieważ modyfikatorem dostępu do znaków warstwy III jest klawisz AltGr, który jest obsługiwany prawą ręką, znaki diakrytyczne tej warstwy umiejscowione zostaną tylko na klawiszach, za których obsługę odpowiada ręka lewa. Układ BÉPO przedstawiono na rysunku 31.

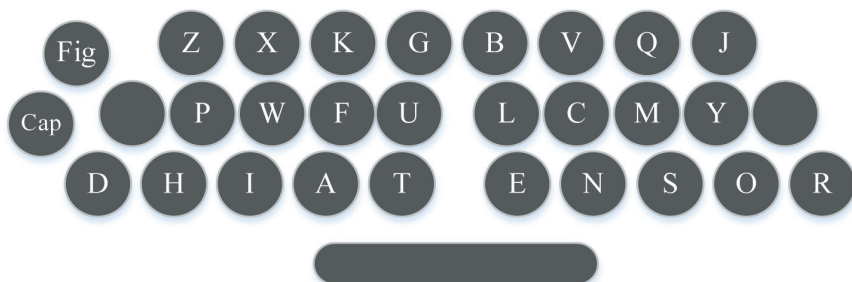


Rys. 31. Układ BÉPO

Źródło: opracowanie własne na podstawie BÉPO 2004

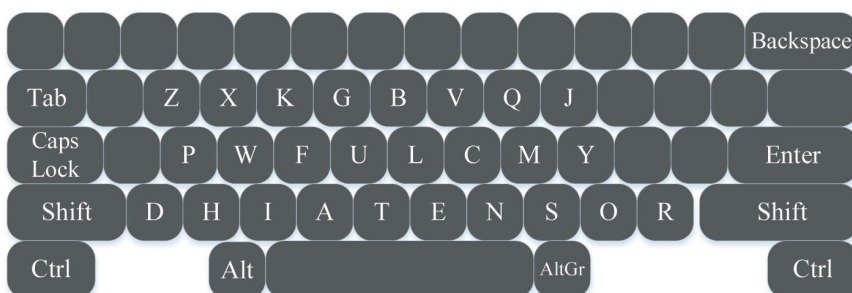
Blickensderfer 5

Kolejny układ został zastosowany w maszynie do pisania zaprojektowanej przez Georga Blickensderfera, której produkcja rozpoczęła się w 1893 roku [Typewriter Museum 2001; Milton 2004]. W 1899 roku maszyna uzyskała ochronę patentową [Blickensderfer 1899]. Dzięki zgrupowaniu w dolnym rzędzie liter najczęściej występujących w języku angielskim możliwe było zwiększenie m.in. liczby słów, które mogły być wpisane za pomocą liter tylko z jednego rzędu, a więc nie wymagały dodatkowych przesunięć palców (rys. 32). Zaproponowany przez Blickensderfera układ, ze względu na litery umieszczone w dolnym rzędzie, określany był również jako „DHIATENSOR” [Typewriter Museum 2001] lub „DIATHENSOR” [Gardey 1998].



Rys. 32. Klawiatura maszyny do pisania Blickensderfer 5
Źródło: opracowanie własne na podstawie Blickensderfer 1899

Na rysunku 33 zaprezentowana została znormalizowana wersja klawiatury maszyny do pisania Blickensderfer 5.



Rys. 33. Znormalizowany i zmodyfikowany układ klawiatury maszyny do pisania Blickensderfer 5

Układ Browera

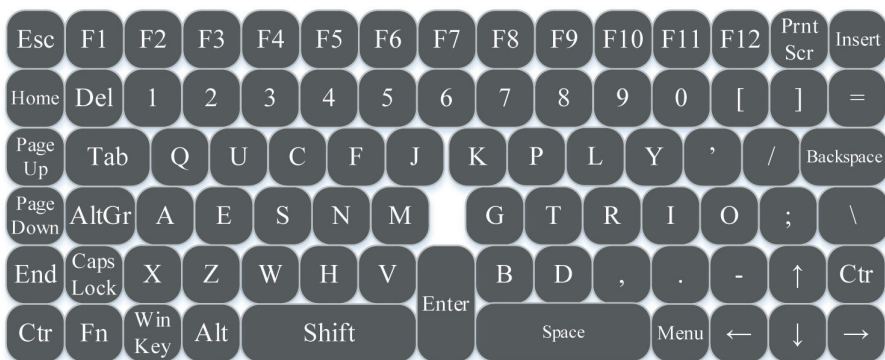
Opatentowany w 1937 roku układ klawiatury autorstwa Raymonda Browera został dostosowany do języka angielskiego [Brower 1937]. Celem, jaki przyświecał projektowaniu układu, było przyspieszenie i ułatwienie pisania [Brower 1937]. Przesłanki, którymi kierował się autor, tworząc własny układ, są analogiczne do przedstawionych przez Dvoraka i Dealeya [1936]. Na rysunku 34 pokazano układ Browera.



Rys. 34. Układ Browera
Źródło: opracowanie własne na podstawie Brower 1937

Układ Browne’a

Opatentowana w 2013 roku klawiatura została opracowana przez Paula Browne’a [Browne 2013]. Zaproponował on znaczącą modyfikację klawiatury, która ma zapewnić większą jej symetryczność, rozumianą jako zrównoważenie liczby klawiszy przypisanych do każdej z rąk. W opatentowanym układzie klawisze specjalne bloku alfanumerycznego zostały w znacznej części przemieszczone, a sam blok rozszerzono o dodatkowe klawisze. Układ został dostosowany do specyfiki języka angielskiego. Cechą wyróżniającą klawiaturę Browne’a jest umieszczenie liter „D” i „H” (które są zaliczane do pierwszej dziesiątki najczęściej występujących liter w języku angielskim) w dolnym rzędzie. Na rysunku 35 zaprezentowano opatentowaną klawiaturę, natomiast rysunek 36 przedstawia układ Browne’a na przyjętym wzorze bloku alfanumerycznego.



Rys. 35. Układ Browne’a

Źródło: opracowanie własne na podstawie Browne 2013



Rys. 36. Układ Browne’a dostosowany do wymogów normy ISO/IEC 9995-2

BvoFRak

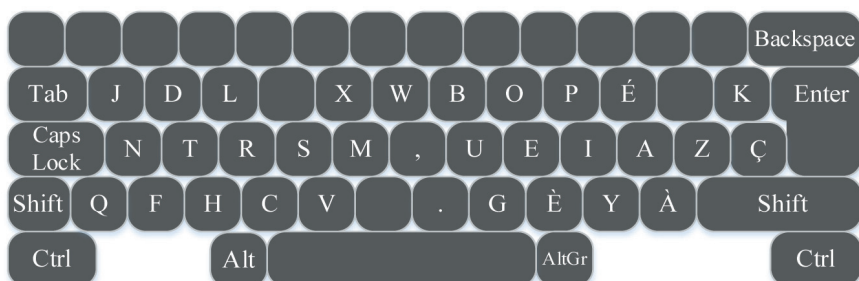
Następny projekt układu stanowi alternatywę dla klawiatur Dvorak-fr oraz BÉPO [Dumez 2011]. Jego autorem jest Hugues Dumez, który prace nad projektem rozpoczął w 2011 roku.

Wśród kryteriów optymalizacji klawiatury Dumez wymienia m.in. następujące:

- palcom małowemu i serdecznemu łatwiej jest obsługiwać klawisze dolnego rzędu niż górnego; w przypadku palców środkowego i wskazującego sytuacja jest odwrotna;
- ponieważ pisanie następuje od strony lewej do prawej, a w języku większość wyrazów zaczyna się na spółgłoskę, samogłoski powinny zostać umieszczone w prawej części klawiatury;
- obciążenie pisanem palców powinno być zróżnicowane w następujący sposób: mały palec powinien być najmniej obciążony, a każdy kolejny coraz bardziej – najbardziej obciążonym pisanem palcem powinien być palec wskazujący.

Autor zaproponował także przesunięcie domyślnego ułożenia palców dla pisania bezrowkowego o jeden klawisz w prawo względem zalecanego położenia. Modyfikacja taka miała zrównoważyć liczbę klawiszy obsługiwanych przez małe palce każdej z rąk.

Celem projektu było stworzenie klawiatury dostosowanej do specyfiki języka francuskiego. W trakcie realizacji projekt został rozszerzony o budowę układu dostosowanego do języka angielskiego, uwzględniającego jednak specyfikę języka francuskiego. Ostatnie opublikowane wersje układów pochodzą z 2012 roku. Na rysunkach 37 i 38 przedstawiono wersję francuską (BvoFRak V1.0) i angielsko-francuską (BvoFRak EN V0.5).



Rys. 37. Układ BvoFRak V1.0

Źródło: opracowanie własne na podstawie Dumez 2011



Rys. 38. Układ BvoFRak EN V0.5

Źródło: opracowanie własne na podstawie Dumez 2011

CADWORK

Układ CADWORK zaprojektowany przez U.J. Udosenę w 2009 roku zdaniem autora stanowi udoskonaloną wersję klawiatury Dvoraka i Dealeya [Udosen 2009]. Zaprezentowano go na rysunku 39.

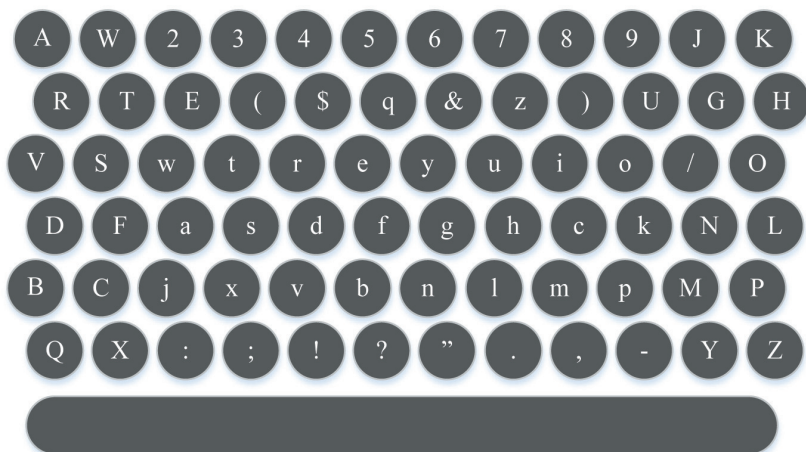


Rys. 39. Układ CADWORK

Źródło: opracowanie własne na podstawie Udosen 2009

Caligraph 2

Maszyna do pisania Caligraph 2 (w odróżnieniu od wersji pierwszej) wyposażona została w obszerną klawiaturę, na której umieszczono zarówno małe, jak i wielkie litery (rys. 40) [Typewriter Museum 2001]. Wyprodukowano ją w 1882 roku, czyli w analogicznym czasie co maszynę Serial No. 2, która umożliwiała przełączanie pomiędzy wielkimi i małymi literami. Zaproponowane w Caligraph 2 rozmieszczenie liter przypomina układ QWERTY, w którym zamieniono miejscami i przesunęło niektóre z liter, starając się jednocześnie pozostawić je w tym samym rzędzie co w QWERTY. Na rysunku 41 zaprezentowano rozmieszczenie liter układu Caligraph 2 dostosowane do współczesnej klawiatury komputerowej.



Rys. 40. Klawiatura maszyny do pisania Caligraph 2

Źródło: opracowanie własne na podstawie Howard 2014



Rys. 41. Układ klawiatury maszyny do pisania Caligraph 2 dostosowany do wymogów normy ISO/IEC 9995-2

Układ Capewella

Autorem następnego projektu, rozwijanego od 2004 roku do 2007 roku, jest Michael Capewell [Capewell 2005]. Celem było stworzenie klawiatury dostosowanej do języka angielskiego. Pierwszym zaproponowanym układem była modyfikacja klawiatury Dvoraka nazwana „Capewell-Dvorak” („C-Dvorak”). Autor zdecydował się m.in. na zmianę umiejscowienia liter współtworzących popularne kombinacje klawiszowe: „Z”, „X”, „C” oraz „V”, które zostały umieszczone na analogicznych jak w QWERTY klawiszach. Powstała w 2004 roku wersję układu C-Dvorak zaprezentowano na rysunku 42.



Rys. 42. Układ Capewell-Dvorak
Źródło: opracowanie własne na podstawie Capewell 2005

Kolejnymi zaprojektowanymi układami były modyfikacje układu QWERTY: Capewell-QWERTY 1/2, Capewell-QWERTY oraz Capewell-QWERTY N, powstałe w 2005 roku. Wszystkie klawiatury różnią się od siebie liczbą i rodzajem zmian w porównaniu z QWERTY. Capewell wyróżnia dwa rodzaje zmian [Capewell 2005]:

1. Przesunięcie litery na klawisz sąsiedni.
2. Przeniesienie litery na klawisz, który nie znajduje się w bezpośrednim sąsiedztwie litery.

Układ C-QWERTY 1/2 jest najbardziej (zdaniem autora) zbliżony do QWERTY (większość wprowadzonych zmian była zmianami 1. rodzaju), natomiast rozmieszczenie liter C-QWERTY N najbardziej się różni od pierwowzoru ze względu na wprowadzenie wielu zmian 2. rodzaju. Układy C-QWERTY 1/2 i C-QWERTY N zostały przedstawione na rysunkach 43 i 44.



Rys. 43. Układ Capewell-QWERTY 1/2

Źródło: opracowanie własne na podstawie Capewell 2005



Rys. 44. Układ Capewell-QWERTY N

Źródło: opracowanie własne na podstawie Capewell 2005

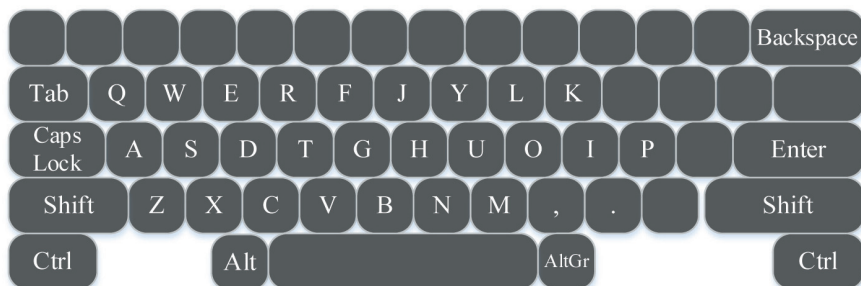
Kolejny zaprojektowany układ to Capewell, który nie był wzorowany na innych układach. Ostateczna wersja układu (0.9.3), nazwana „Close Keys”, pochodzi z 2005 roku (rys. 45) [Capewell 2005].



Rys. 45. Układ Capewell

Źródło: opracowanie własne na podstawie Capewell 2005

Ostatnią klawiaturą zaprezentowaną przez Capewella jest układ QWERF (rys. 46), nad którym prace zakończono w 2007 roku [Capewell 2005]. Stanowi on modyfikację układu QWERTY i wyróżnia się niewielką liczbą zmian, polegających głównie na zamianie miejscami dwóch sąsiednich liter.



Rys. 46. Układ QWERF

Źródło: opracowanie własne na podstawie Capewell 2005

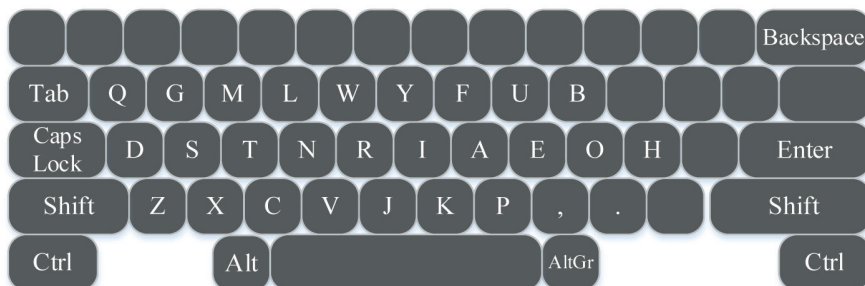
W swoich rozważaniach autor zaproponował także zmianę kryterium naprzemiennego pisania kolejnych znaków obiema rękami na zmianę ręki po wpisaniu przez nią dwóch znaków.

Carpalx

W 2005 roku zapoczątkowany został projekt autorstwa Martina Krzywinskiego [Krzywinski 2005], którego celem było stworzenie układu dostosowanego do specyfiki języka angielskiego. W trakcie realizacji projektu powstało wiele nowych układów, m.in.:

- najgorszy możliwy układ dla języka angielskiego;
- układy obejmujące maksymalnie 5 lub 10 zmian liter w odniesieniu do QWERTY (gdzie jedna zmiana oznacza zamianę miejscami dwóch liter).

Najlepszym – zdaniem autora – opracowanym układem jest QGMLWY (rys. 47). Jego cechą charakterystyczną jest takie samo jak w przypadku QWERTY ułożenie liter współtworzących popularne skróty klawiszowe („Z”, „X”, „C” oraz „V”).



Rys. 47. Układ QGMLWY

Źródło: opracowanie własne na podstawie Krzywinski 2005

W roku 2014 (we współpracy z Thalią Verkade) Krzywinski zaproponował rozmieszczenie klawiszy dostosowane do języka holenderskiego. Powstały układ został nazwany „De Correspondent” (rys. 48).

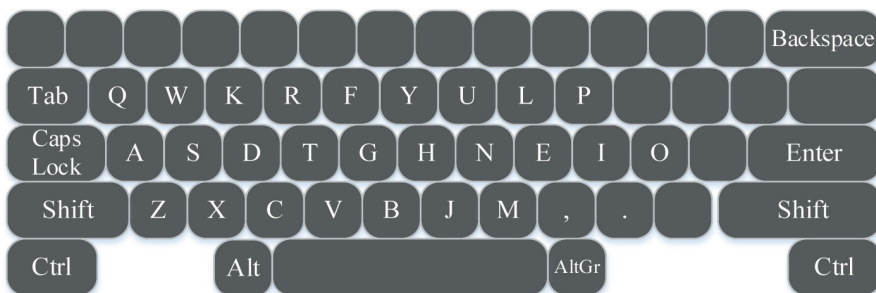


Rys. 48. Układ De Correspondent

Źródło: opracowanie własne na podstawie Krzywinski 2005

CarpalxQ

Układ CarpalxQ został opublikowany w 2007 roku [CarpalxQ Keyboard Layout 2007]. Jego nazwa powstała z połączenia nazw elementów wykorzystanych do budowy układu: projektu Carplax autorstwa Krzywinskiego [Krzywinski 2005] oraz klawiatury QWERTY. Projektowaną klawiaturę dostosowano do specyfiki języka angielskiego. Na rysunku 49 przedstawiono układ CarpalxQ.



Rys. 49. Układ CarpalxQ

Źródło: opracowanie własne na podstawie Walker 2007

Układ Choate'a

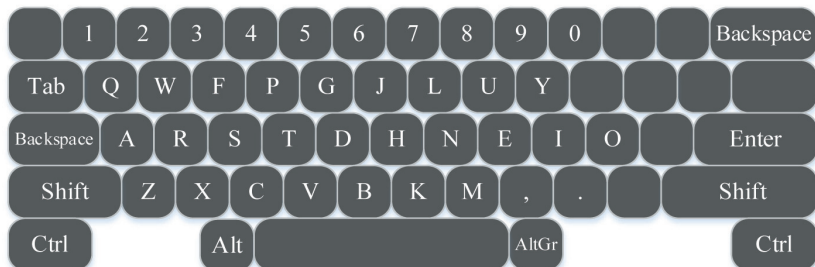
W opatentowanym w 1996 roku zgłoszeniu autorstwa Johna Choate'a przedstawionych zostało dziewięć układów, z których pięć uwzględnia specyfikę języka angielskiego, natomiast pozostałe hiszpańskiego, francuskiego, włoskiego i niemieckiego [Choate 1996]. Wszystkie klawiatury powstały w wyniku modyfikacji QWERTY polegającej na umieszczeniu w rzędzie domowym dziesięciu liter najczęściej występujących w danym języku. Na rysunku 50 przedstawiono jeden z układów dostosowanych do specyfiki języka angielskiego.



Rys. 50. Układ Choate'a – wersja angielska
Źródło: opracowanie własne na podstawie Choate 1996

Colemak

Prace nad układem zostały zakończone 1 stycznia 2006 roku. Autorem klawiatury jest Shai Coleman, od którego nazwiska pochodzi jej nazwa. Układ zoptymalizowano pod kątem języka angielskiego, jednak umożliwia wprowadzanie znaków diakrytycznych występujących w ponad 40 językach. Colemak stanowi alternatywę dla układów QWERTY i Dvoraka, jednocześnie czerpiąc z obu klawiatur i eliminując ich najsłabsze punkty. Klawisze współtworzące najpopularniejsze skróty klawiszowe („Z”, „X”, „C” oraz „V”) umiejscowiono analogicznie jak w układzie QWERTY. W układzie Colemak klawisz Caps Lock zastąpiony został przez klawisz Backspace. Na rysunkach 51 i 52 zaprezentowano klawiaturę Colemak oraz jej znormalizowaną wersję.



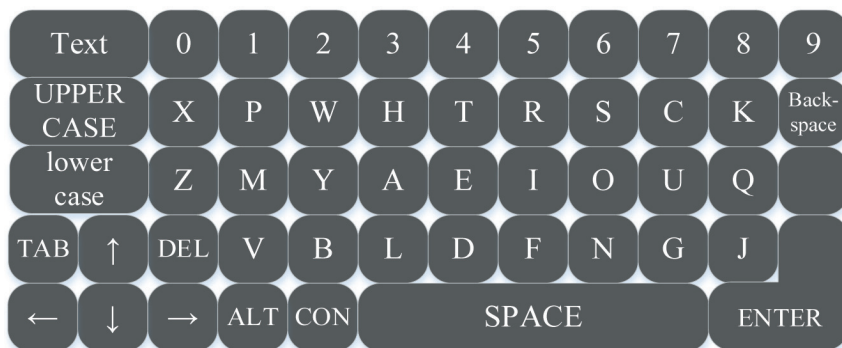
Rys. 51. Układ Colemak
Źródło: opracowanie własne na podstawie Coleman 2006



Rys. 52. Znormalizowany układ Colemak
Źródło: opracowanie własne na podstawie Coleman 2006

Układ Cramptona

Opatentowana w 2005 roku klawiatura Cramptona przeznaczona została dla urządzeń przenośnych, takich jak na przykład palmtop [Crampton 2005]. John Crampton, który jest autorem układu, dostosował go do specyfiki języka angielskiego. W zaproponowanym rozwiązaniu autor zgrupował najczęściej występujące w angielskim litery w trzech rzędach środkowej części klawiatury. Opatentowany układ został zaprezentowany na rysunku 53, natomiast na rysunku 54 przedstawiono znormalizowaną wersję układu Cramptona.



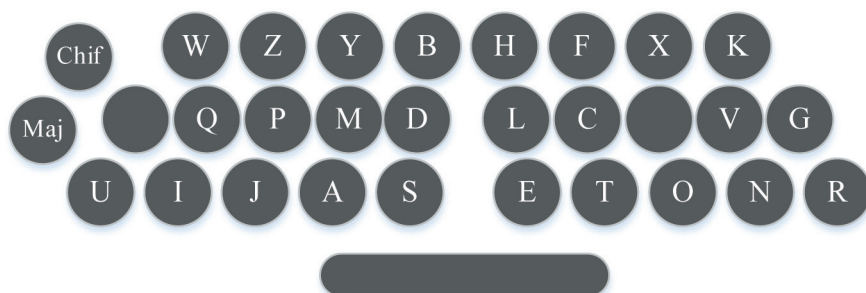
Rys. 53. Klawiatura autorstwa Johna Cramptona
Źródło: opracowanie własne na podstawie Crampton 2005



Rys. 54. Znormalizowany układ Cramptona

Dactyle

Maszyny do pisania z serii Dactyle były dystrybuowaną w Europie (głównie we Francji) odmianą blickensderferów. Produkcja pierwszych egzemplarzy (wzorowanych na modelu 5) ruszyła w 1893 roku w Paryżu [Typewriter Museum 2001]. Rozmieszczenie liter na klawiaturze zostało zmodyfikowane względem pierwowzoru – w dolnym rzędzie umieszczono litery najczęściej występujące w języku francuskim (rys. 55). Współczesną wersję klawiatury zaprezentowano na rysunku 56.



Rys. 55. Klawiatura maszyny do pisania Dactyle
Źródło: opracowanie własne na podstawie Typewriter Museum 2001



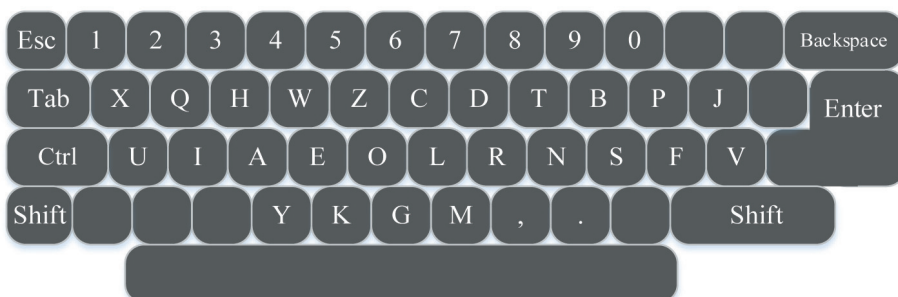
Rys. 56. Współczesny układ klawiatury maszyny do pisania Dactyle

De-ergo

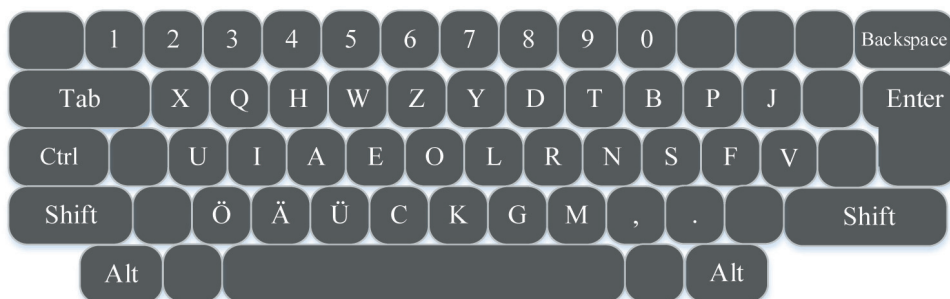
Układ De-ergo został zaprojektowany przez Hartmuta Goebela w 2000 roku [Goebel 2000]. Inspiracją do stworzenia nowego układu był artykuł autorstwa Helmuta Wolframa pt. *Hand aufs Herz: Was halten Sie von diesem Keyboard? – Die Skandalchronik der Tastatur*, który opublikowano w 1985 roku [Goebel 2000]. Zaprezentowana w nim klawiatura (rys. 57) miała stanowić alternatywę dla układu QWERTZ, który był wówczas wykorzystywany w Niemczech. Wolfram zwraca w artykule uwagę na dodatkowe możliwości wykorzystania klawisza Control (Ctrl), który wraz z klawiszem Esc został przemieszczony w przedstawionej klawiaturze. Zdaniem Wolframa możliwe byłoby wykorzystanie przycisku Control do wprowadzania dodatkowych symboli. Mógł być to powód nieumieszczenia na klawiaturze przycisków Alt i AltGr.

Układ autorstwa Goebela, wzorowany na przedstawionej w artykule klawiaturze i uwzględniający sugestię dotyczącą klawisza Ctrl, jako jeden z pierwszych zawierał więcej niż cztery warstwy – De-ergo liczy ich osiem. Dostęp do warstwy V i kolejnych uzyskiwany jest za pomocą przycisku Ctrl. Tak jak w przypadku klawiatury zaprezentowanej w artykule Wolframa klawisz Control zastąpił przycisk Caps Lock. Inną wprowadzoną przez autora modyfikacją jest wyraźne powiększenie klawisza Tab, a także

dodanie dodatkowego przycisku do każdego z rzędów bloku alfanumerycznego. Klawiatura De-ergo została zaprezentowana na rysunku 58. Jej zestandaryzowaną wersję przedstawiono na rysunku 59.



Rys. 57. Klawiatura zaprezentowana przez Helmuta Wolframa
 Źródło: opracowanie własne na podstawie Goebel 2000



Rys. 58. Klawiatura De-ergo
 Źródło: opracowanie własne na podstawie Goebel 2000



Rys. 59. Znormalizowany układ De-ergo

Dvorak-fr

Autorem następnego układu jest Francis Leboutte, który w 2002 roku stworzył jego pierwszą wersję [Leboutte 2002]. Klawiatura Dvorak-fr została zaprojektowana

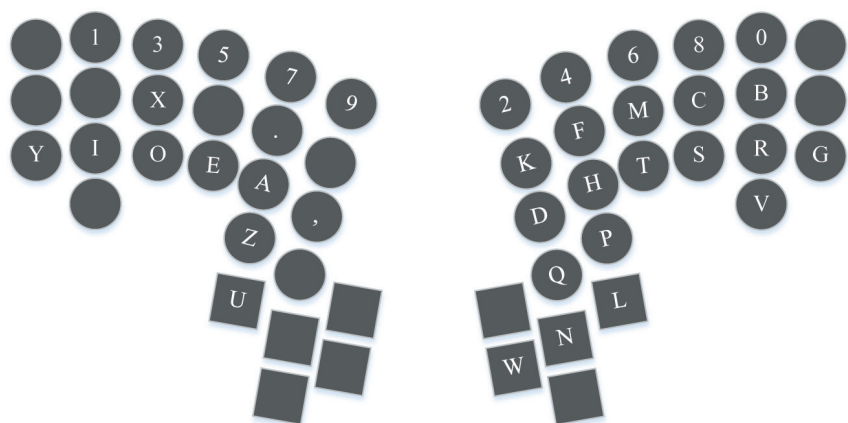
na podstawie kryteriów zaproponowanych przez Dvoraka i Dealeya. Stąd wzięła się też nazwa układu, który jest francuską wersją klawiatury Dvoraka. W układzie Dvorak-fr zmodyfikowano rozmieszczenie znaków alfanumerycznych w celu dostosowania klawiatury do specyfiki języka francuskiego. Klawisz Caps Lock zastąpiono przyciskiem VER, który pozwala na dostęp do znaków warstwy II (Caps Lock pozwala na dostęp do warstwy II jedynie w przypadku klawiszy zawierających litery, klawisz VER nie ma takiego ograniczenia). Przedstawiona na rysunku 60 wersja układu została zaprojektowana w 2003 roku.



Rys. 60. Znormalizowany układ Dvorak-fr

Układy Einbindera z 1975 i 1976 roku

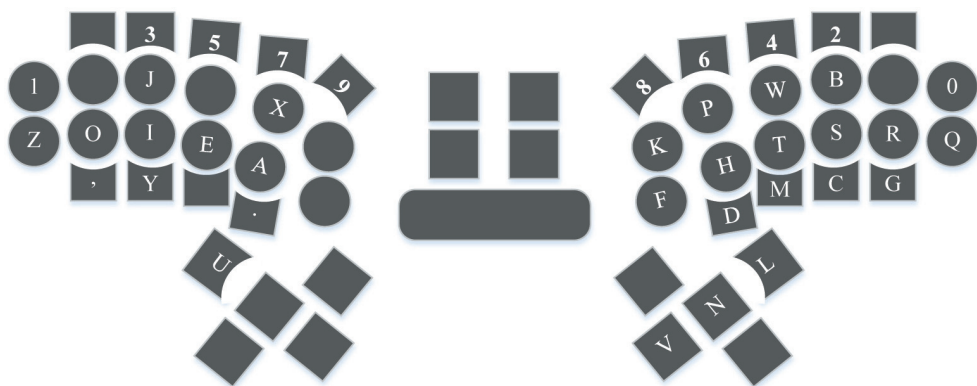
Grupa układów autorstwa Harveya Einbindera została opatentowana w 1975 roku [Einbinder 1975]. Przygotował je on z myślą o zaprojektowanej przez siebie klawiaturze, która charakteryzuje się przestrzenną formą, rozdzieleniem klawiszy przypisanych do danej ręki, a także zwiększeniem liczby klawiszy obsługiwanych przez kciuk. W patencie przedstawionych zostało sześć układów dostosowanych do specyfiki języków: angielskiego, niemieckiego, włoskiego, francuskiego, hiszpańskiego i portugalskiego. Do optymalizacji rozmieszczenia znaków wykorzystano kryteria Dvoraka i Dealeya. W 1976 roku Einbinder opatentował kolejny projekt przestrzennej klawiatury wraz z sześcioma układami dostosowanymi do wymienionych języków [Einbinder 1976]. Na rysunkach 61 oraz 63 przedstawione zostały przytoczone układy (w wersji angielskiej). Na uwagę zasługuje podział cyfr między ręce: prawa ręka obsługuje cyfry parzyste, natomiast lewa – nieparzyste. Ze względu na duże różnice pomiędzy formą klawiatury zgodnej z normą ISO/IEC 9995-2 a formami klawiatur opatentowanych przez Einbindera znormalizowane układy będą stanowiły możliwie najlepsze, ale nie dokładne ich odwzorowanie. Przedstawione na rysunkach 62 i 64 układy stanowią znormalizowane wersje angielskich wersji klawiatur Einbindera.



Rys. 61. Układ Einbindera z 1975 roku
 Źródło: opracowanie własne na podstawie Einbinder 1975



Rys. 62. Znormalizowany układ Einbindera z 1975 roku
 Źródło: opracowanie własne na podstawie Einbinder 1975



Rys. 63. Układ Einbindera z 1976 roku
 Źródło: opracowanie własne na podstawie Einbinder 1976



Rys. 64. Znormalizowany układ Einbindera z 1976 roku

Źródło: opracowanie własne na podstawie Einbinder 1976

Układy Einbindera z 1982 roku

W 1982 roku Harvey Einbinder opatentował kolejne dwa układy [Einbinder 1982]. Pierwszy dostosowany jest do języka angielskiego, natomiast drugi – do języka niemieckiego. Wśród wykorzystanych kryteriów optymalizacji rozmieszczenia znaków na klawiaturze Einbinder wymienia m.in. następujące:

- osiem najczęściej występujących w danym języku liter powinno zostać umieszczonych na pozycjach wyjściowych palców;
- litery w rzędzie domowym nie zostaną przyporządkowane do danej ręki na podstawie tego, czy dana litera jest samogłoską, czy spółgłoską (taki podział był wykorzystywany m.in. w klawiaturze Dvoraka w celu wymuszania naprzemienności wykorzystania obu rąk);
- prawa ręka obsługiwała będzie większą liczbę klawiszy, ponieważ u większości ludzi jest ona ręką sprawniejszą.

Opatentowana klawiatura wyróżnia się m.in. kształtem klawiszy, a także ich różną wysokością, która powoduje, że kolejne rzędy (poczynając od numerycznego) układają się w opadającą równię pochyłą. Przyporządkowanie klawiszy do obsługi przez dany palec jest analogiczne jak w przypadku klawiatur zgodnych z normą ISO/IEC 9995-2:2009, dlatego układ został przedstawiony jedynie na klawiaturze zgodnej z wymienioną normą. Na rysunku 65 pokazano wersję angielską klawiatury, natomiast na rysunku 66 zaprezentowano układ dostosowany do języka niemieckiego.



Rys. 65. Znormalizowany układ Einbindera z 1982 roku (wersja angielska)

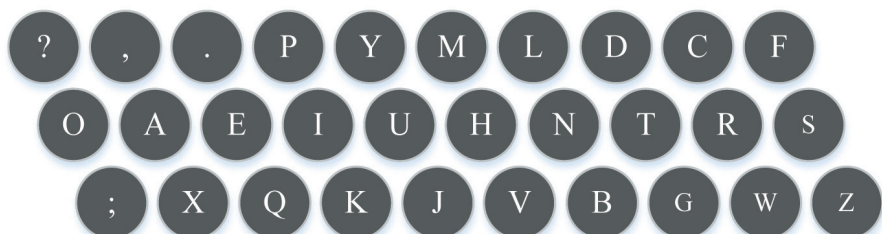
Źródło: opracowanie własne na podstawie Einbinder 1982



Rys. 66. Znormalizowany układ Einbindera z 1982 roku (wersja niemiecka)
 Źródło: opracowanie własne na podstawie Einbinder 1982

English keyboard

Kolejną klawiaturę opatentowano w 1974 roku [English keyboard 1974]. Imię i nazwisko autora układu nie zostały zawarte w zgłoszeniu patentowym. Klawiatura dostosowana jest do specyfiki języka angielskiego, co wyjaśnia nazwę układu. Podane w patencie kryteria optymalizacji są zbieżne z opisanymi przez Dvoraka i Dealeya. Powstały dwie wersje układu: przeznaczona dla osób praworęcznych i leworęcznych, przy czym jedna stanowi lustrzane odbicie drugiej. Na rysunkach 67 i 68 zaprezentowany został układ dla osób praworęcznych oraz jego znormalizowana wersja.



Rys. 67. Układ English keyboard – wersja dla praworęcznych
 Źródło: opracowanie własne na podstawie English keyboard 1974



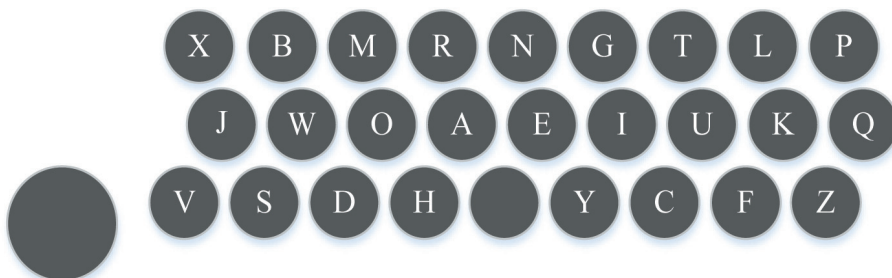
Rys. 68. Znormalizowany układ English keyboard – wersja dla praworęcznych

EurKEY

Układ EurKEY opracował Steffen Brüntjen [Brüntjen 2008], który zmodyfikował układ QWERTY, dodając do warstwy III i IV znaki diakrytyczne charakterystyczne dla (zdaniem autora) języków europejskich. Na uwagę zasługuje fakt, że znaki diakrytyczne języka polskiego (z wyjątkiem „Ó”) nie zostały umieszczone na klawiaturze. Ponieważ warstwa I układu EurKEY jest analogiczna do QWERTY, rysunek ze schematem klawiatury pominięto.

Fitch 1

Fitch 1 to wyprodukowana w 1888 roku przez Fitch Typewriter Company maszyna do pisania, której rozkład klawiszy znacząco różnił się od układu QWERTY [Typewriter Museum 2001; Messenger 2014]. Na klawiaturze maszyny Fitch 1 (rys. 69) większość samogłosek została umieszczona w rzędzie środkowym. Takie zgrupowanie samogłosek może świadczyć o podjęciu próby budowy ergonomicznej klawiatury, która mogłaby pozwolić na przyspieszenie pisania dzięki bardziej przemyślanemu rozlokowaniu liter. Warto zwrócić również uwagę na ograniczenie wielkości klawiatury do trzech rzędów i nieumieszczenie na niej klawiszy z cyframi. Na rysunku 70 została zaprezentowana znormalizowana wersja klawiatury Fitch 1.



Rys. 69. Klawiatura maszyny do pisania Fitch 1

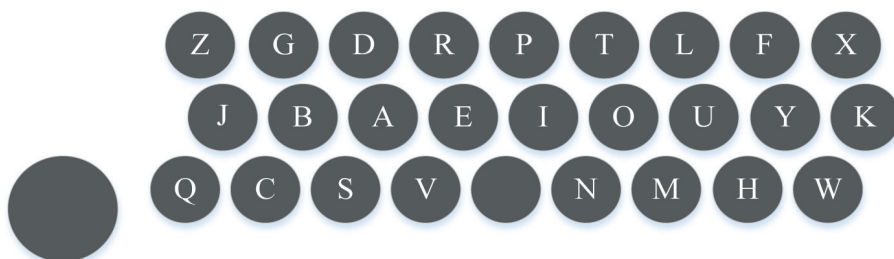
Źródło: opracowanie własne na podstawie Typewriter Museum 2001; Messenger 2014



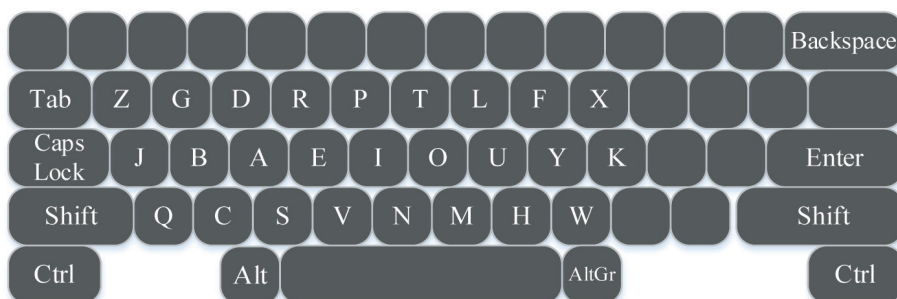
Rys. 70. Znormalizowany układ klawiatury maszyny do pisania Fitch 1

Fitch 2

Druga wersja maszyny do pisania Fitch 1, przeznaczona dla brytyjskich odbiorców, została wyprodukowana w 1891 roku [Typewriter Museum 2001; Messenger 2014]. Model Fitch 2 wyposażono w zmodyfikowaną wersję klawiatury znanej z pierwszej wersji maszyny. W nowym układzie wszystkie samogłoski umieszczono w jednym rzędzie (rys. 71 oraz 72).



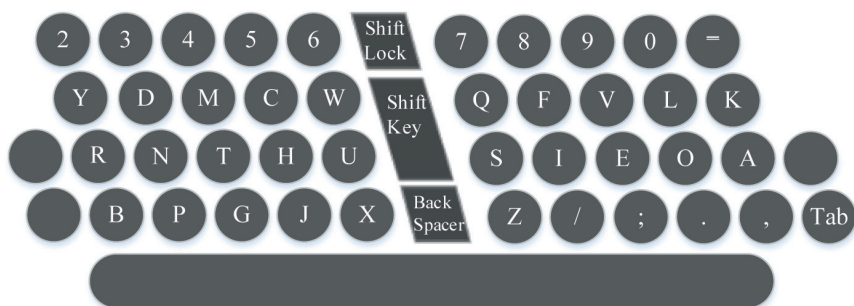
Rys. 71. Klawiatura maszyny do pisania Fitch 2
Źródło: opracowanie własne na podstawie liveauctioneers.com



Rys. 72. Znormalizowany układ klawiatury maszyny do pisania Fitch 2

Układ Hoke'a

Autorem kolejnego układu jest Roy Hoke [Hoke 1924]. Projekt klawiatury opracowano w 1924 roku, z uwzględnieniem specyfiki języka angielskiego. Autor przeprowadził m.in. badania dotyczące zależności pomiędzy popełnianymi przy pisaniu błędami a położeniem litery, która nie została poprawnie wpisana. Z badań tych wynika, że najbardziej obciążone palce wydają się mniej dokładne. Rozwiązaniem tego problemu miało być takie rozłokowanie liter, które pozwoliłoby na równomierne obciążenie wszystkich palców. Hoke porusza też problem umiejscowienia klawiszy specjalnych – jego zdaniem powinny się one znaleźć w środkowej części klawiatury, aby obie ręce mogły z nich swobodnie korzystać. Na rysunku 73 przedstawiony został opatentowany przez Hoke'a układ. Znormalizowaną wersję układu zaprezentowano na rysunku 74.



Rys. 73. Klawiatura Hoke'a

Źródło: opracowanie własne na podstawie Hoke 1924



Rys. 74. Znormalizowany układ Hoke'a

HCESAR

Układ klawiatury HCESAR w 1937 roku został przyjęty dekretem premiera António de Oliveiry Salazara jako obowiązujący w Portugalii [Decreto-Lei 1937]. Nazwa pochodzi od pierwszych sześciu liter górnego wiersza klawiatury. Na uwagę zasługuje brak na klawiaturze cyfr „0” i „1”, a także przypisanie tylko jednej litery do obsługi przez mały palec lewej ręki. Na rysunku 75 zaprezentowano klawiaturę HCESAR, natomiast na rysunku 76 przedstawiono jej znormalizowaną wersję.



Rys. 75. Klawiatura HCESAR

Źródło: opracowanie własne na podstawie Decreto-Lei 1937



Rys. 76. Znormalizowany układ klawiatury HCESAR

iKare

Projekt klawiatury iKare został opublikowany w 2015 roku [iKare 2015]. Układ stanowi modyfikację QWERTY, w której zmieniono pozycję pięciu sąsiadujących ze sobą liter i jednego znaku. Na rysunku 77 przedstawiono klawiaturę iKare wraz ze wskazaniem klawiszy, którym przypisano inny znak w odniesieniu do QWERTY.



Rys. 77. Układ iKare

Źródło: opracowanie własne na podstawie iKare 2015

Juli16

Kolejny układ, autorstwa Pietera Hogendoorna, został zaprojektowany w 2014 roku [Mathematical Multicore 2014]. Klawiaturę dostosowano do języka holenderskiego, ale uwzględnia również specyfikę takich języków jak angielski, niemiecki, francuski, hiszpański i włoski. Układ Juli16 został przedstawiony na rysunku 78.



Rys. 78. Układ Juli16

Źródło: opracowanie własne na podstawie Mathematical Multicore 2014

Układ Klauslera

Układ autorstwa Petera Klauslera powstał na początku XXI wieku [Klausler 2002; Capewell 2005]. Klawiatura dostosowana została do specyfiki języka angielskiego. Optimalizacja układu obejmowała 30 klawiszy położonych w 3 rzędach (klawisze rzędu numerycznego nie podlegały optymalizacji), do których przypisano 26 liter i 4 znaki. Do optymalizacji wykorzystany został algorytm ewolucyjny. Efekty działania algorytmu przedstawiono na rysunku 79.

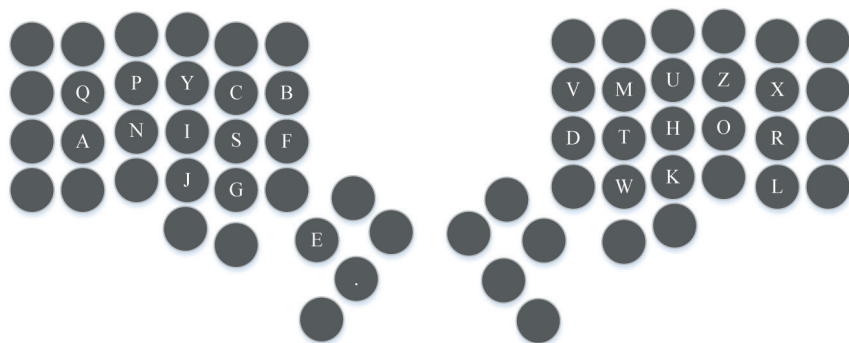


Rys. 79. Układ Klauslera

Źródło: opracowanie własne na podstawie Klausler 2002

Układ Malt

Układ opatentowała Lillian Malt w 1981 roku [Malt 1981]. Klawiatura Malt wyróżnia się zarówno kształtem, jak i rozmieszczeniem klawiszy: plan ich rozmieszczenia jest trójwymiarowy. Klawisze podzielono na dwie grupy, z których każda obsługiwana jest przez jedną rękę. Do rozmieszczenia znaków na zaprojektowanym planie klawiatury autorka wykorzystała kryteria Dvoraka oraz wzięła pod uwagę specyfikę języka angielskiego. Zaprojektowany przez Lillian Malt układ został wykorzystany do stworzenia klawiatury Maltron [PCD Maltron 1988].



Rys. 80. Układ Malt

Źródło: opracowanie własne na podstawie Malt 1981

Opatentowany układ przedstawiony został na rysunku 80. Ze względu na specyfikę rozmieszczenia znaków w układzie Malt (litera „E” jest obsługiwana przez kciuk) nie ma możliwości dokładnego odwzorowania rozmieszczenia liter opisywanego układu na klawiaturze w standardzie ISO/IEC 9995-2. Na rysunku 81 pokazano możliwie najdokładniejszą wersję znormalizowanej klawiatury Malt.



Rys. 81. Układ Malt dostosowany do standardu ISO/IEC 9995-2
Źródło: opracowanie własne na podstawie Malt 1981

Mandarin

Klawiatura opatentowana przez Colmana Bernatha w 1993 roku [Bernath 1993]. Układ zaprojektowany został w celu umożliwienia zapisu informacji fonetycznych języka mandaryńskiego. Do optymalizacji układu wykorzystano kryteria Dvoraka i Dealeya, uwzględniając zależności występujące w języku mandaryńskim. Na rysunku 82 przedstawiono znormalizowany układ Mandarin.

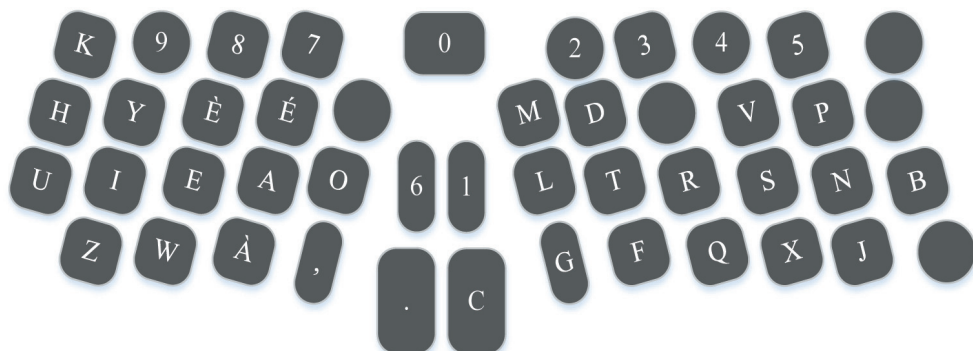


Rys. 82. Znormalizowany układ Mandarin
Źródło: opracowanie własne na podstawie Bernath 1993

Układ Marsana

Układ autorstwa Claude’a Marsana przeznaczono dla języka francuskiego [Marsan 1988]. Klawiatura została opatentowana w 1988 roku. Autor zaproponował nowe

ułożenie klawiszy, jak również zmodyfikował ich wielkość i kształt. Przedstawiony na rysunku 83 układ dostosowano dla osób praworęcznych. Na rysunku 84 zaprezentowano znormalizowaną wersję klawiatury Marsan.



Rys. 83. Układ Marsan

Źródło: opracowanie własne na podstawie Marsan 1988



Rys. 84. Znormalizowany układ Marsan

Źródło: opracowanie własne na podstawie Marsan 1988

Minimak

Autorem projektu jest Ted Lilley, który w 2012 roku zaprojektował trzy układy klawiatur stanowiące modyfikację układu QWERTY [Lilley 2012]. Celem było stworzenie układu, którego możliwe łatwo mogliby nauczyć się obecni użytkownicy QWERTY. Jednocześnie projektowany układ miał umożliwiać efektywniejsze (zgodnie z kryteriami Dvoraka i Dealeya) pisanie z wykorzystaniem klawiatury. Każdy z zaproponowanych przez Lilleya układów charakteryzuje się odmienną liczbą znaków, które zostały przemieszczone w porównaniu z QWERTY. Na rysunkach 85–87 przedstawiono klawiatury, w których zmieniono odpowiednio 4, 8 i 12 pozycji znaków.



Rys. 85. Układ Minimak z 4 zmianami
Źródło: opracowanie własne na podstawie Lilley 2012



Rys. 86. Układ Minimak z 8 zmianami
Źródło: opracowanie własne na podstawie Lilley 2012



Rys. 87. Układ Minimak z 12 zmianami
Źródło: opracowanie własne na podstawie Lilley 2012

MTGAP

W 2007 roku Michael Dickens zapoczątkował projekt [Dickens 2007, 2008], w ramach którego powstało kilka układów klawiatur dostosowanych do specyfiki języka angielskiego, z czego dwa najnowsze (dla znormalizowanej klawiatury oraz klawiatury Kinesis)

datowane są na 2012 rok. W swoim projekcie autor wykorzystuje do optymalizacji kryteria Dvoraka i Dealeya, które uzupełnia o własne:

- litery współtworzące najpopularniejsze skróty („Z”, „X”, „C”) powinny pozostać na analogicznych do układu QWERTY miejscach;
- nowy układ powinien być łatwy do nauki dla osób wykorzystujących klawiaturę QWERTY.

Na rysunku 88 przedstawiony został najnowszy układ MTGAP przeznaczony dla standardowych (zgodnych z normą ISO/IEC 9995-2) klawiatur.

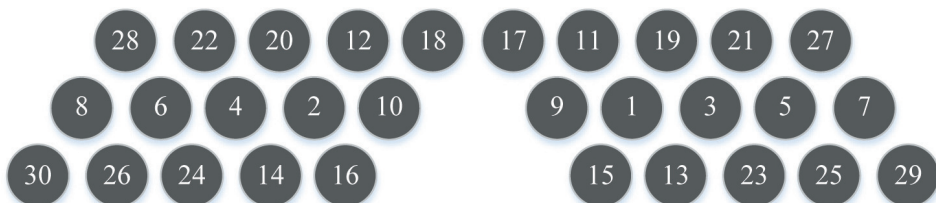


Rys. 88. Układ MTGAP

Źródło: opracowanie własne na podstawie Dickens 2007

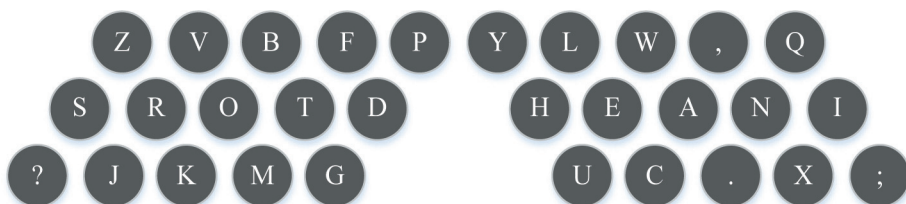
Multiple

Klawiatura Multiple została opatentowana w 1986 roku przez Rogera McGunnigle’a [McGunnigle 1986]. W opisie patentowym autor proponuje usprawnienia dotyczące mechanizmów maszyn do pisania, jak również przedstawia schemat tworzenia układów klawiatur na podstawie statystyk częstości występowania liter w danym języku. W tym celu zaprojektowana została matryca z klawiszami oznaczonymi numerem litery (które uszeregowano malejąco pod względem częstotliwości występowania w danym języku), jaka ma być przypisana do danego klawisza. Na rysunku 89 pokazano zaproponowaną przez McGunnigle’a matrycę klawiatury, natomiast na rysunku 90 zaprezentowano klawiaturę dostosowaną do języka angielskiego, stworzoną z wykorzystaniem zdemonstrowanej matrycy. Na ostatnim rysunku (rys. 91) przedstawiono znormalizowany układ dla języka angielskiego.

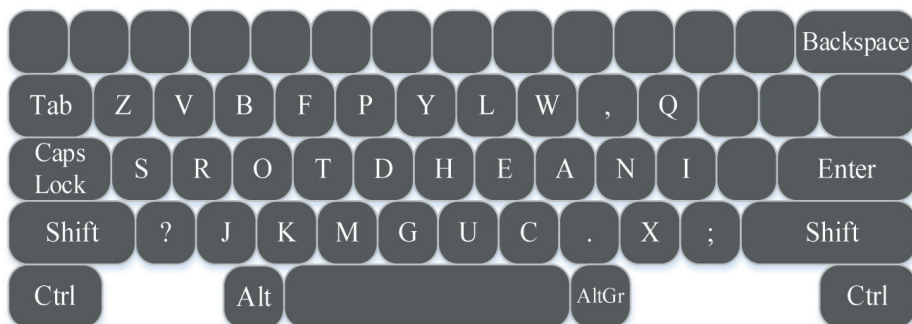


Rys. 89. Matryca układu Multiple

Źródło: opracowanie własne na podstawie McGunnigle 1986



Rys. 90. Układ Multiple dla języka angielskiego
Źródło: opracowanie własne na podstawie McGunnigle 1986



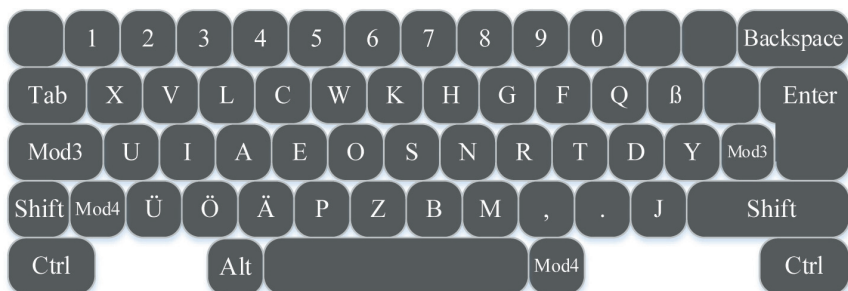
Rys. 91. Znormalizowany układ Multiple dla języka angielskiego
Źródło: opracowanie własne na podstawie McGunnigle 1986

Neo

Następny projekt poświęcony tworzeniu klawiatury zapoczątkowano z inicjatywy Hanno Behrensa w 2004 roku [Behrens 2005]. Opracowywany układ jest dostosowany do języka niemieckiego. Projekt jest w dalszym ciągu rozwijany w ramach współpracy internautów [Neo-Layout 2004]. Układ Neo charakteryzuje się sześcioma warstwami, do których dostęp zapewniają dodatkowe klawisze umieszczone na klawiaturze. Pierwsza wersja została zaprojektowana z wykorzystaniem kryteriów Dvoraka i Dealeya, a także własnych spostrzeżeń, np.:

- palcom wskazującemu i środkowemu łatwiej jest wpisywać znaki umieszczone w górnym rzędzie w porównaniu z rzędem dolnym;
- w przypadku palców małego i serdecznego sytuacja jest odwrotna.

Na dalszy rozwój układu miały wpływ uwagi i spostrzeżenia internautów współtworzących projekt. Na rysunku 92 przedstawiono najnowszą wersję układu Neo oznaczoną numerem 2. Na rysunku 93 zaprezentowano znormalizowaną wersję klawiatury.



Rys. 92. Układ Neo, wersja 2

Źródło: opracowanie własne na podstawie Neo-Layout 2004

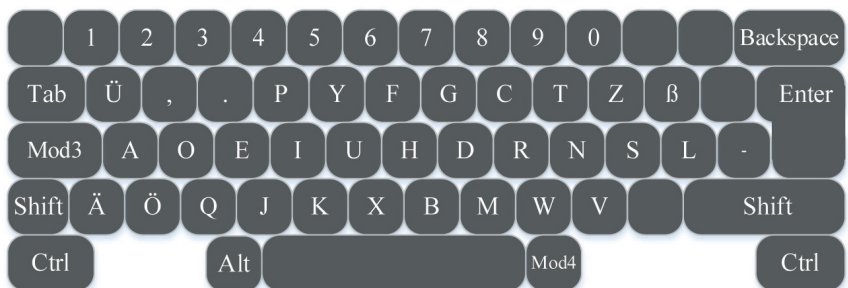


Rys. 93. Znormalizowana wersja 2 układu Neo

Źródło: opracowanie własne na podstawie Neo-Layout 2004

„Niemiecki typ II”

Kolejny układ to niemiecka wersja klawiatury Dvoraka stworzona na podstawie statystyk języka niemieckiego i kryteriów Dvoraka i Dealeya [Stegemann 2001]. Układ ten stanowi jeden z wielu przykładów klawiatur narodowych, będących odmianami klawiatury Dvoraka dostosowanymi do specyfiki danego języka. Na rysunku 94 przedstawiono klawiaturę „Niemiecki typ II”.

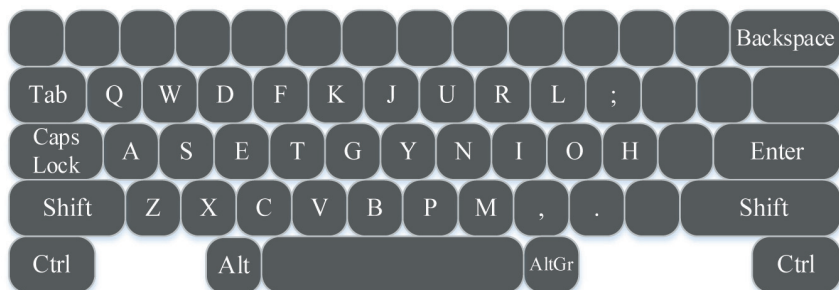


Rys. 94. Układ „Niemiecki typ II”

Źródło: opracowanie własne na podstawie Stegemann 2001

Układ Normana

Klawiatura Normana stanowi modyfikację układu QWERTY. Jej autorem jest David Norman [Norman 2014], którego celem było zaprojektowanie układu stanowiącego konsensus pomiędzy układem optymalnym a układem łatwym do nauki dla osób używających QWERTY (m.in. klawisze współtworzące najpopularniejsze skróty powinny pozostać na dotychczasowych miejscach). Do wykonania projektu układu zostały wykorzystane statystyki języka angielskiego. Klawiaturę Normana przedstawiono na rysunku 95.



Rys. 95. Układ Normana

Źródło: opracowanie własne na podstawie Norman 2014

Plum

Autorką klawiatury Plum jest Debra Woods [Woods 2005]. Układ został opatentowany w 2005 roku. Klawiaturę zoptymalizowano z wykorzystaniem statystyk języka angielskiego. Litery rozlokowano na klawiaturze w taki sposób, aby ciągi kolejnych przycisków tworzyły słowa. Na rysunku 96 przedstawiony został opatentowany układ, natomiast na rysunku 97 – układ Plum dostosowany do normy ISO/IEC 9995-2.



Rys. 96. Układ Plum

Źródło: opracowanie własne na podstawie Woods 2005

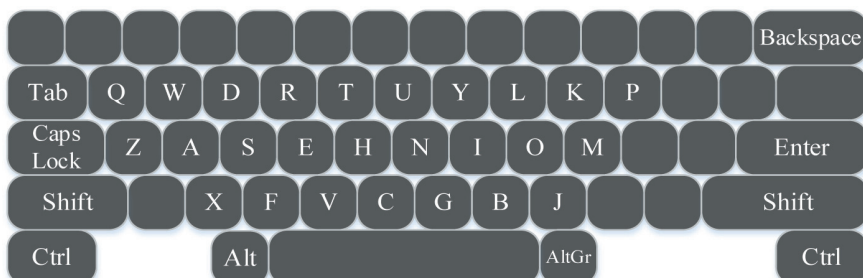


Rys. 97. Znormalizowany układ Plum

Źródło: opracowanie własne na podstawie Woods 2005

Quasi-QWERTY

Układ klawiatury Quasi-QWERTY zaproponowany na konferencji w Atlancie w 2010 roku przeznaczono dla urządzeń mobilnych [Bi i in. 2010]. Autorami klawiatury są Xiaojun Bi, Barton Smith oraz Shumin Zhai. Układ stanowi rozwiązanie kompromisowe pomiędzy rozkładem w pełni zoptymalizowanym a układem stanowiącym modyfikację QWERTY. Do optymalizacji wykorzystane zostały statystyki języka angielskiego. Na rysunku 98 przedstawiono układ Quasi-QWERTY na klawiaturze zgodnej z normą ISO/IEC 9995-2.



Rys. 98. Układ Quasi-QWERTY

Źródło: opracowanie własne na podstawie [Bi in. 2010]

QWPR

Projekt układu jest rozwijany od 2013 roku przez Jamesona Quinna [Quinn 2013]. QWPR dostosowany jest do specyfiki języka angielskiego, jednak wspiera wszystkie zapisywane alfabetem łacińskim. Zawarcie w układzie tak wielu znaków diakrytycznych było możliwe dzięki zastosowaniu 20 warstw. Układ Quinna został stworzony na podstawie klawiatury QWERTY. Autor starał się wprowadzać możliwie mało zmian względem pierwowzoru, aby ułatwić użytkownikom QWERTY zmianę układu na QWPR. Celem zaproponowanych modyfikacji było zwiększenie szybkości pisania przy jednoczesnej minimalizacji sumarycznej długości wykonywanych przez palce ruchów. Dodatkową modyfikacją wprowadzoną w układzie QWPR jest zastąpienie

klawisza Caps Lock drugim klawiszem AltGr, a także przeniesienie klawisza Tab do górnego rzędu, a w jego miejsce dodanie dodatkowego przycisku Backspace (rys. 99). Na rysunku 100 przedstawiony został znormalizowany układ QWPR.



Rys. 99. Układ QWPR

Źródło: opracowanie własne na podstawie Quinn 2013



Rys. 100. Znormalizowany układ QWPR

Źródło: opracowanie własne na podstawie Quinn 2013

RISTOME

Układ RISTOME zaprojektowali Peter Stoye, Torsten Rieger oraz Justus Menzel [Stoye i in. 2005]. Klawiatura powstała w 2005 roku i dostosowana została do specyfiki języka niemieckiego. Autorzy układu wykorzystali do optymalizacji wybrane kryteria Dvoraka i Dealeya. Na rysunku 101 zaprezentowano układ RISTOME.



Rys. 101. Układ RISTOME

Źródło: opracowanie własne na podstawie Stoye i in. 2005

Układ Rowella

Kolejny układ klawiatury opatentował w 1909 roku Sidney Rowell [Rowell 1909]. Klawiatura została dostosowana do języka angielskiego – statystycznie najczęściej występujące litery tego języka zgrupowano w centralnej części klawiatury (w górnym, środkowym i dolnym rzędzie). Układ Rowella przedstawiono na rysunku 102.

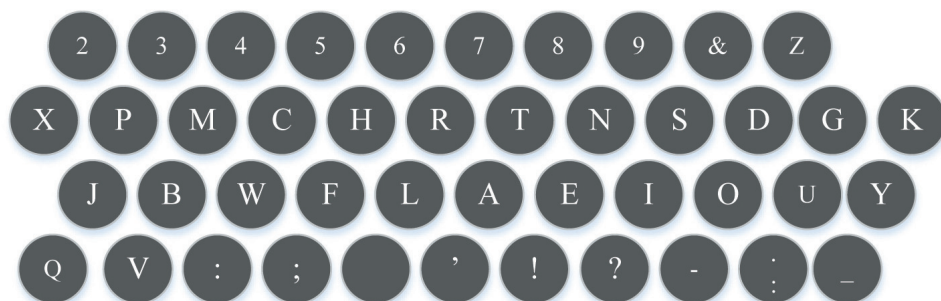


Rys. 102. Układ Rowella

Źródło: opracowanie własne na podstawie Rowell 1909

Układ Scholes'a

W 1896 roku Christopher Scholes – twórca układu QWERTY – opatentował maszynę do pisania z nowym układem klawiatury [Scholes 1896]. Wyróżnia się on zgrupowaniem samogłosek (w porządku alfabetycznym) w prawej części rzędu środkowego. Zabieg ten miał prawdopodobnie na celu zwiększenie ergonomii pisania. Jest to także element, który zdecydowanie odróżnia klawiaturę Scholes'a od QWERTY. Na rysunkach 103 oraz 104 przedstawiono układ Scholes'a oraz jego znormalizowaną wersję.



Rys. 103. Układ Scholes'a

Źródło: opracowanie własne na podstawie Scholes 1896



Rys. 104. Znormalizowany układ Scholesa
Źródło: opracowanie własne na podstawie Scholes 1896

Układ Trotmana

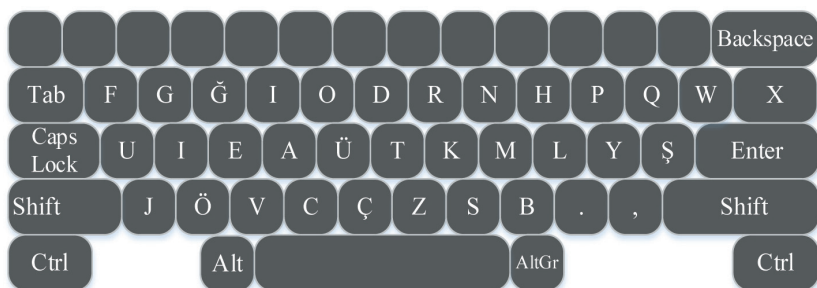
Kolejny układ opatentował w 2005 roku Douglas Trotman [Trotman 2005]. Charakteryzuje się on rozmieszczeniem znaków (liter, cyfr i symboli) na podstawie charakterystyk ich wyglądu – znaki, które zdaniem autora klawiatury są do siebie najbardziej podobne, zostały umieszczone w jednej kolumnie. Zgodnie z opisem patentowym takie rozmieszczenie liter ma na celu ułatwienie nauki układu. Na rysunku 105 zaprezentowano klawiaturę Trotmana.



Rys. 105. Układ Trotmana
Źródło: opracowanie własne na podstawie Trotman 2005

„Turecki układ F”

„Turecki układ F” zaprojektował Ýhsan Yener w latach 50. XX wieku [Yener 2014]. Klawiatura powstała w wyniku badań nad charakterystyką ruchów ludzkiej ręki oraz specyfiką języka tureckiego. Na rysunku 106 przedstawiono „Turecki układ F”.

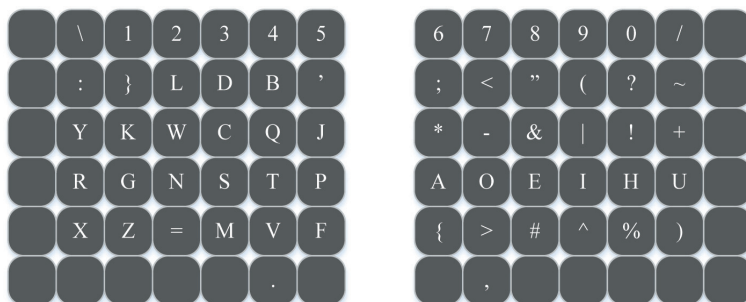


Rys. 106. „Turecki układ F”

Źródło: opracowanie własne na podstawie Yener 2014

Układ Wagnera

Zespół czterech naukowców (Marc Wagner, Bernard Yannou, Steffen Kehl oraz Dominique Feillet) opracował zbiór trzech układów klawiatur stworzonych dla języków: angielskiego, francuskiego i niemieckiego [Wagner i in. 2003]. Autorzy, tworząc model optymalizacji rozmieszczenia znaków, wykorzystali m.in. kryteria Dvoraka i Dealeya. Wagi każdemu z kryteriów nadano na podstawie konsultacji z dwójką specjalistów z zakresu ergonomii. Na rysunkach 107 oraz 108 zostały przedstawione wersja oryginalna i znormalizowana układu dostosowanego do specyfiki języka angielskiego.



Rys. 107. Klawiatura Wagnera

Źródło: opracowanie własne na podstawie Wagner i in. 2003

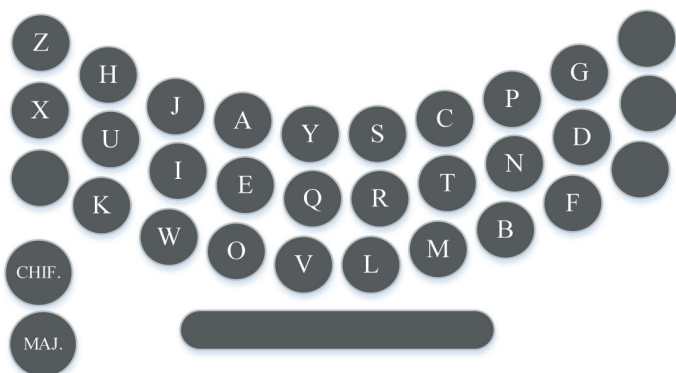


Rys. 108. Znormalizowana klawiatura Wagnera

Źródło: opracowanie własne na podstawie Wagner i in. 2003

ZHJAY

Układ ZHJAY zaprezentowany przez francuskiego naukowca Alberta Navarre’a [Gardey 1998] powstał na początku XX wieku i przeznaczony był dla języka francuskiego. Na rysunkach 109 i 110 przedstawiono klawiaturę ZHJAY w wersji oryginalnej oraz znormalizowanej.



Rys. 109. Klawiatura ZHJAY

Źródło: opracowanie własne na podstawie Gardey 1998



Rys. 110. Znormalizowany układ klawiatury ZHJAY

XPeRT

Autorem układu XPeRT powstałego w 2003 roku i opatentowanego w roku 2006 jest Rike Maria Wedding [XPeRT 2003; Wedding 2006]. Wedding w zaprojektowanym przez siebie układzie położył główny nacisk na tempo pisania, a także na łatwość nauczenia się układu przez osoby wykorzystujące do pisania klawiaturę QWERTY. Zdaniem autora najważniejsze dla tempa pisania jest rozdzielenie najczęściej występujących kombinacji dwuliterowych pomiędzy obie ręce (z tego też powodu w jednym z zaprojektowanych układów zdublował literę „E”, aby można ją było wpisać dowolną ręką), a także unikanie wykorzystywania małego palca. Wedding nie stosuje przy optymalizacji kryterium zgrupowania najczęściej występujących liter w środkowym rzędzie. W ramach patentu autor zaproponował trzy układy, które zostały przedstawione na rysunkach 111–113.



Rys. 111. Klawiatura XPeRT One
 Źródło: opracowanie własne na podstawie Wedding 2006



Rys. 112. Klawiatura XPeRT Express
 Źródło: opracowanie własne na podstawie Wedding 2006



Rys. 113. Klawiatura XPeRT Two
 Źródło: opracowanie własne na podstawie Wedding 2006

1.4. Podsumowanie

Problematyka rozmieszczenia znaków na klawiaturze jest nadal aktualna, o czym może świadczyć liczba wciąż powstających nowych projektów klawiatur. Na uwagę zasługuje również ciągłe rozwijanie klawiatur wirtualnych oraz układów przeznaczonych dla urządzeń mobilnych [Zhai i in. 2002; Li i in. 2006; Rick 2010]. Wprowadzenie

normy ISO/IEC 9995-2:2009 przyczyniło się do standaryzacji układu klawiatury komputerowej, co umożliwia porównywanie klawiatur między sobą. Daje to także możliwość zestawienia kryteriów rozmieszczania znaków, które zostały wykorzystane do zaprojektowania danych klawiatur, ponieważ kryteria te dotyczyły klawiatur zgodnych z tą samą normą.

Warto także zwrócić uwagę na duże zainteresowanie możliwościami wykorzystania większej liczby warstw klawiatury. W przypadku języków zawierających litery diakrytyczne wykorzystanie warstw III i IV wydaje się naturalną konsekwencją zwiększonej liczby liter w stosunku do alfabetu łacińskiego. Dlatego też dla osób piszących w języku polskim wykorzystanie klawisza AltGr jest konieczne do wpisywania liter diakrytycznych, jednak klawisz ten nie jest wykorzystywany do wpisywania znaków nie-literowych. Zdaniem autora na tę lukę należy zwrócić uwagę podczas optymalizacji układu klawiatury.

Zaprezentowane w niniejszej monografii układy w zdecydowanej większości stanowią modyfikację QWERTY lub są projektowane na podstawie kryteriów czerpiących z opracowania Dvoraka i Dealeya. Wymieniane w literaturze kryteria optymalizacji rozmieszczenia znaków na klawiaturze nie pokrywają się, a niejednokrotnie wzajemnie się wykluczają (w szczególności taką sytuację można zaobserwować w przypadku układów dostosowanych do specyfiki języka polskiego). W związku z występowaniem przeciwstawnych względem siebie kryteriów, jak na przykład maksymalizacja częstości bigramów wpisywanych tym samym palcem (wskazującym, środkowym lub serdecznym) [Zubrzycka 1963] oraz minimalizacja częstości bigramów pisanych tym samym palcem [Dvorak, Dealey 1936], można wysnuć wniosek, że nie wszystkie występujące w literaturze kryteria optymalizacji rozmieszczenia znaków na klawiaturze są poprawne.

Wśród autorów układów klawiatur, prócz przyjmowania różnych kryteriów optymalizacji, nie ma także zgodności co do wielkości wagi, jaką należy przypisać do danego kryterium. Projektowane układy mogą być zatem optymalne zgodnie z opracowanym modelem, jednak sam model może nie w pełni odwzorowywać specyfikę pisania na klawiaturze. Z tego też względu przeprowadzone zostały dodatkowe badania empiryczne, których celem było wyznaczenie parametrów modelu optymalizacji rozmieszczenia znaków alfanumerycznych na klawiaturze komputera. Opis badania oraz analiza jego rezultatów stanowią treść dwóch kolejnych rozdziałów niniejszego opracowania.

2. Projekt badania empirycznego

Jak zostało to zaprezentowane w rozdziale 1, autorzy klawiatur stosują różne kryteria optymalizacji rozmieszczenia znaków na klawiaturze, dlatego autor niniejszego opracowania zdecydował się na przeprowadzenie własnych badań, których celem była weryfikacja zasadności wykorzystywanych kryteriów, a także nadanie każdemu z nich wagi. Omówione w literaturze badania dotyczące analizy wpływu różnych czynników na m.in. prędkość pisanie są mało reprezentatywne ze względu na niewielką liczbę osób biorących w nich udział. Hiraga, Ono i Hisano [1980] w swoim artykule przedstawili badanie, w którym uczestniczyła 1 osoba, a w badaniach Dasgupty i innych oraz Hughesa i współpracowników [2002] uczestniczyło po 5 osób. Smith i Zhai [2001] oraz Norman i Fisher [1992] przeprowadzili badanie na grupach 12-osobowych, natomiast Karat i współpracownicy [1999] – na 24 osobach. Jedynie Fagarasanu ze współpracownikami [2005] oraz Lee i Zhai [2004] przeprowadzili badania na grupach minimum 30-osobowych (odpowiednio 30- i 34-osobowych). Liczba uczestników jest istotna ze względu na statystyczną analizę wyników oraz reprezentatywność otrzymanych rezultatów.

Opisane badanie empiryczne polegało na przeprowadzeniu eksperymentu, w trakcie którego grupa osób odpowiadała na pytania zamknięte. Pytania te miały na celu zebranie informacji dotyczących wybranych cech uczestników (m.in. wieku, płci czy wykorzystywanego na co dzień układu klawiatury). Kolejnym elementem badania empirycznego było przepisanie specjalnie w tym celu spreparowanego tekstu. W literaturze nie istnieje przyjęty wzorzec tworzenia treści na potrzeby wspomnianego badania. W opracowaniach Dasgupty i innych [2010] oraz Hughesa i innych [2002] treść eksperymentu stanowiły wszystkie możliwe bigramy składające się z liter. Hiraga i inni [1980] wykorzystali fragmenty książek opisujących losy Alicji w Krainie Czarów. W badaniu Karat i innych [1999] wykorzystano fragment książki o Dzikim Zachodzie. Autorzy przeanalizowali także wpisywane przez uczestników badania odpowiedzi na zadawane pytania w formie krótkich wiadomości [Karat i in. 1999]. Treść badania Normana i Fischera [1992] stanowił artykuł z czasopisma, natomiast Lee i Zhai [2004] stworzyli

bazę zawierającą 200 sentencji (po 12 słów każda) pochodzących z gazet. Kolejne badanie [Smith, Zhai 2001] zawiera dwie części, z których pierwsza składała się z liter języka angielskiego w uszeregowanych alfabetycznie, natomiast część druga stanowiła połączenie wielu zdań z różnych źródeł (zawierała m.in. znany angielski lipogram, fragment deklaracji niepodległości czy fragment przemowy gettysburskiej). Autor nie podaje metody doboru zdań składających się na treść eksperymentu.

W dalszej części opracowania przedstawiono szczegółowy opis badania.

2.1. Opis badania

Zaproponowany w niniejszej części pracy eksperyment miał na celu zbadanie wpływu różnych czynników (np. naprężenności pisania, wykorzystywania podczas pisania klawiszy funkcyjnych, liczby wykorzystywanych do pisania palców) na szybkość i ergonomię pisania, a także na liczbę popełnianych błędów. Eksperyment podzielony został na dwie części:

1. Ankieta dotycząca podstawowych informacji o osobie biorącej udział w eksperymencie (m.in. płeć, wiek, liczba wykorzystywanych do pisania palców, wykorzystywany w codziennej pracy układ klawiatury).
2. Przepisanie przez użytkownika dobranego na potrzeby badania tekstu.

Kluczowym elementem eksperymentu jest część druga, która miała na celu zgromadzenie danych ilościowych dotyczących:

- wpływu zmiany wykorzystywanej do pisania ręki na prędkość i dokładność pisania;
- czasu dostępu do danego klawisza, przy uwzględnieniu położenia klawisza bezpośrednio go poprzedzającego w pisany ciąg znaków;
- wpływu wykorzystania klawiszy specjalnych;
- liczby i typu popełnianych błędów oraz ich wpływu na czas pisania.

Na podstawie wyników części drugiej eksperymentu (przy uwzględnieniu wyników części pierwszej) sprawdzono zależności występujące w trakcie pisania.

2.1.1. Badanie ankietowe

Pierwszą część eksperymentu stanowiła ankieta dotycząca ogólnych informacji o osobie biorącej udział w badaniu. Składała się ona głównie z pytań zamkniętych. Każde z pytań miało na celu uzyskanie informacji, które mogą wpływać na osiągnięte

w pozostałych częściach badania wyniki (np. sprawdzenie, czy w tempie pisania występuje różnica pomiędzy osobami wykorzystującymi do pisania wszystkie palce a pozostałymi badanymi). Poniżej zamieszczono listę informacji o uczestnikach, których dotyczyły pytania (wraz z wyjaśnieniem celowości danego pytania):

1. Rok urodzenia – ponieważ naukę obsługi komputera rozpoczynają coraz młodsze osoby, wiek może wpływać na sprawność posługiwania się klawiaturą komputera i zdaniem autora warto zweryfikować taką hipotezę.
2. Kierunek studiów – w trakcie kształcenia na niektórych kierunkach studiów większa liczba zajęć wymaga wykorzystywania komputera (jak np. w przypadku studiów informatycznych), co może mieć wpływ na uzyskane w badaniu wyniki.
3. Rok studiów – tok studiów wymusza korzystanie z komputerów, dlatego osoby studiujące dłużej mogą być sprawniejsze w obsłudze komputera.
4. Płeć – występujące różnice w budowie fizycznej kobiet i mężczyzn (np. grubość i długość palców) mogą się przyczyniać do innego stylu pisania, co może przełożyć się na rozbieżności w wynikach uzyskiwanych przez kobiety i mężczyzn.
5. Lateralizacja kończyn górnych – w zależności od tego, czy osoba jest leworęczna, praworęczna, czy oburęczna, sprawniej może wpisywać znaki przypisane do preferowanej ręki.
6. Liczba wykorzystywanych do pisania palców – pomiędzy osobami wykorzystującymi różną liczbę palców mogą pojawić się różnice m.in. w szybkości pisania oraz rodzaju popełnianych błędów.
7. Wykorzystywany układ klawiatury – sprawdzenie, czy dana osoba podczas codziennej pracy z komputerem używa układu QWERTY, który jest układem wykorzystanym przy opracowywaniu badania. W przypadku gdy badana osoba wykorzystuje inny układ, jej wyniki poddane zostaną odrębnej analizie.

2.1.2. Opis badania eksperymentalnego

Druga część eksperymentu polegała na przepisaniu przez badanego wyświetlonego na ekranie monitora fragmentu tekstu. Celem tego działania była weryfikacja wpływu położenia danego klawisza na czas niezbędny na jego wciśnięcie. Zbadano również wpływ statystycznej częstości występowania przypisanych do klawiszy liter na czas wpisywania tej litery (a tym samym – na czas użycia klawisza z daną literą). Aspekt ten nie został poruszony w żadnej z analizowanych przez autora publikacji.

Przed rozpoczęciem przepisywania zadanego fragmentu tekstu osoba badana miała czas na zapoznanie się z treścią. Działanie to miało zminimalizować przerwy w pisaniu związane z odczytywaniem kolejnych wyrazów. W trakcie badania uczestnik miał podgląd wpisywanej treści, co umożliwiało mu korektę ewentualnych błędów.

Każde przyciśnięcie dowolnego klawisza było rejestrowane wraz z dokładnym czasem, kiedy nastąpiło.

Tak zebrane dane umożliwiły m.in. obliczenie czasu pomiędzy wciśnięciem dwóch kolejnych klawiszy.

Część druga eksperymentu została podzielona na cztery fragmenty (bloki):

- I. Blok niespreparowanego tekstu – blok przygotowano tak, że zmiana wykorzystywanej do pisanie ręki może następować w dowolnym momencie; jako treść posłużyły wybrane fragmenty książek.
- II. Blok naprzemiennego pisanie obiema rękami – wymuszona (na podstawie przypisania klawiszy do palców dla pisanie bezwzrokowego) została całkowita naprzemienność wykorzystania rąk (każdy kolejny znak pisanie był inną ręką niż znak poprzedni i następny).
- III. Blok zmiany ręki co dwa znaki – treść tego bloku wymuszała zmianę rąk dokładnie co dwa wprowadzone znaki.
- IV. Blok ze znakami numerycznymi – blok oprócz liter zawierał także cyfry.

Każdy z bloków (z wyjątkiem ostatniego) podzielono na dwie sekcje – wstępną i zasadniczą. Zadaniem pierwszej jest zapoznanie badanego ze sposobem doboru słów w danym bloku – nie zostanie on wprost poinformowany o kryteriach doboru tekstu, jednak będzie miał możliwość nabrania wprawy w sposobie pisanie wymuszonym przez daną sekcję (np. pisanie naprzemiennym obiema rękami). Wyniki sekcji drugiej (zasadniczej) posłużą jako dane ilościowe do dalszych badań.

Opisana konstrukcja drugiej części eksperymentu ma na celu wyizolowanie jednego z kluczowych czynników wpływających na tempo pisanie, jakim jest zmiana rąk podczas pisanie. Jak zostało przedstawione w rozdziale 1, kryterium naprzemienności pisanie jest jednym z najczęściej przytaczanych, dlatego autor zdecydował o podziale przepisywanych przez badanych treści ze względu na to kryterium. Trzy pierwsze bloki charakteryzują się odmienną pod tym względem konstrukcją (zmiana rąk dokładnie po jednym wpisanym znaku, po dwóch znakach lub w dowolnym momencie). Celem bloku IV było zbadanie wpływu wykorzystania rzędu numerycznego.

Po zakończeniu przepisywania tekstów zawartych we wszystkich blokach zadaniem badanego była subiektywna ocena trudności pisanie każdego z bloków zawierających spreparowane treści.

2.1.3. Dobór tekstu eksperymentu

Opracowując tekst na potrzeby badania, wykorzystano klawiaturę QWERTY, ponieważ jest to układ, na którym przeprowadzony został eksperyment. W tabeli 1 zamieszczono dane zawierające informacje o położeniu danego znaku w układzie QWERTY.

Tabela 1
Kodowanie znaków w układzie QWERTY

Znak	Ręka	Palec	Rząd	Diakrytyk (znak + AltGr)	Znak + Shift
a	lewa	mały palec	domowy	nie	nie
ą	lewa	mały palec	domowy	tak	nie
b	lewa	palec wskazujący	dolny	nie	nie
c	lewa	środkowy palec	dolny	nie	nie
ć	lewa	środkowy palec	dolny	tak	nie
d	lewa	środkowy palec	domowy	nie	nie
e	lewa	środkowy palec	górny	nie	nie
ę	lewa	środkowy palec	górny	tak	nie
f	lewa	palec wskazujący	domowy	nie	nie
g	lewa	palec wskazujący	domowy	nie	nie
h	prawa	palec wskazujący	domowy	nie	nie
i	prawa	środkowy palec	górny	nie	nie
j	prawa	palec wskazujący	domowy	nie	nie
k	prawa	środkowy palec	domowy	nie	nie
l	prawa	palec serdeczny	domowy	nie	nie
ł	prawa	palec serdeczny	domowy	tak	nie
m	prawa	palec wskazujący	dolny	nie	nie
n	prawa	palec wskazujący	dolny	nie	nie
ń	prawa	palec wskazujący	dolny	tak	nie
o	prawa	palec serdeczny	górny	nie	nie
ó	prawa	palec serdeczny	górny	tak	nie
p	prawa	mały palec	górny	nie	nie
r	lewa	palec wskazujący	górny	nie	nie
s	lewa	palec serdeczny	domowy	nie	nie
ś	lewa	palec serdeczny	domowy	tak	nie
t	lewa	palec wskazujący	górny	nie	nie
u	prawa	palec wskazujący	górny	nie	nie
w	lewa	palec serdeczny	górny	nie	nie
y	prawa	palec wskazujący	górny	nie	nie

Tabela 1 cd.

Znak	Ręka	Palec	Rząd	Diakrytyk (znak + AltGr)	Znak + Shift
z	lewa	mały palec	dolny	nie	nie
ż	lewa	palec serdeczny	dolny	tak	nie
ž	lewa	mały palec	dolny	tak	nie
q	lewa	mały palec	górny	nie	nie
v	lewa	palec wskazujący	dolny	nie	nie
x	lewa	palec serdeczny	dolny	nie	nie
,	prawa	środkowy palec	dolny	nie	nie
.	prawa	palec serdeczny	dolny	nie	nie
;	prawa	mały palec	domowy	nie	nie
[	prawa	mały palec	górny	nie	nie
]	prawa	mały palec	górny	nie	nie
'	prawa	mały palec	domowy	nie	nie
/	prawa	mały palec	dolny	nie	nie
<	prawa	mały palec	dolny	nie	tak
>	prawa	mały palec	dolny	nie	tak
?	prawa	mały palec	dolny	nie	tak
:	prawa	mały palec	domowy	nie	tak
1	lewa	mały palec	numeryczny	nie	nie
2	lewa	mały palec	numeryczny	nie	nie
3	lewa	palec serdeczny	numeryczny	nie	nie
4	lewa	środkowy palec	numeryczny	nie	nie
5	lewa	palec wskazujący	numeryczny	nie	nie
6	lewa	palec wskazujący	numeryczny	nie	nie
7	prawa	palec wskazujący	numeryczny	nie	nie
8	prawa	palec wskazujący	numeryczny	nie	nie
9	prawa	środkowy palec	numeryczny	nie	nie
0	prawa	palec serdeczny	numeryczny	nie	nie
-	prawa	mały palec	numeryczny	nie	nie
+	prawa	mały palec	numeryczny	nie	nie
!	lewa	mały palec	numeryczny	nie	tak

Tabela 1 cd.

Znak	Ręka	Palec	Rząd	Diakrytyk (znak + AltGr)	Znak + Shift
@	lewa	mały palec	numeryczny	nie	tak
#	lewa	palec serdeczny	numeryczny	nie	tak
\$	lewa	środkowy palec	numeryczny	nie	tak
%	lewa	palec wskazujący	numeryczny	nie	tak
^	lewa	palec wskazujący	numeryczny	nie	tak
&	prawa	palec wskazujący	numeryczny	nie	tak
*	prawa	palec wskazujący	numeryczny	nie	tak
(	prawa	środkowy palec	numeryczny	nie	tak
)	prawa	palec serdeczny	numeryczny	nie	tak
_	prawa	mały palec	numeryczny	nie	tak
+	prawa	mały palec	numeryczny	nie	tak

Blok I

Jako treść bloku I wybrany został następujący fragment książki *Władca Pierścieni* autorstwa Johna Ronalda Reuela Tolkiena w przekładzie Marii Skibniewskiej [Tolkien 2012]:

„Trzy Pierścienie dla królów elfów pod otwartym niebem,
Siedem dla władców krasnali w ich kamiennych pałacach,
Dziewięć dla śmiertelników, ludzi śmierci podległych,
Jeden dla Władcy Ciemności na czarnym tronie
W Krainie Mordor, gdzie zaległy cienie,
Jeden, by wszystkimi rządzić, Jeden, by wszystkie odnaleźć,
Jeden, by wszystkie zgromadzić i w ciemności związać
W Krainie Mordor, gdzie zaległy cienie.”

Uzupełnieniem zaprezentowanego tekstu będą pierwsze cztery wersy *Pana Tadeusza* autorstwa Adama Mickiewicza [Mickiewicz 2003]:

„Litwo! Ojczyzno moja! ty jesteś jak zdrowie.
Ile cię trzeba cenić, ten tylko się dowie,
Kto cię stracił. Dziś piękność twą w całej ozdobie
Widzę i opisuję, bo tęsknię po tobie.”

Przedstawione fragmenty będą stanowić treść bloku pierwszego, który został podzielony na dwie sekcje w następujący sposób: pierwszą sekcję tworzą dwa pierwsze wersy *Władcy Pierścieni*, a druga sekcja obejmuje pozostałe wersy dzieła Tolkiena oraz zaprezentowany fragment *Pana Tadeusza*.

Autor wybrał fragment *Władcy Pierścieni* ze względu na wysokie prawdopodobieństwo znajomości tego tekstu przez uczestników badania, co powinno pozytywnie wpłynąć na tempo wpisywania treści. Występowanie w tekście powtórzonych słów („Jeden”, „Mordor”) pozwoliło na sprawdzenie powtarzalności czasu wpisywania poszczególnych liter przez daną osobę biorącą udział w eksperymencie. Inwokacja *Pana Tadeusza* została wybrana ze względu na to, że – zdaniem autora – większość uczestników powinna znać jej treść na pamięć. W związku z tym można było sprawdzić, jaki wpływ na czas pisania ma fakt, że tekst jest wpisywany z pamięci, a więc nie ma konieczności czytania treści z monitora komputera.

Blok II

Do budowy treści bloku II i III wykorzystano dane zamieszczone w tabeli 1, a także słownik języka polskiego [Słownik sjp.pl 2014]. Z zakodowanych zgodnie z zaprezentowanym kluczem słów wybrane zostały wyrazy, które pisane z wykorzystaniem układu QWERTY wymuszają zmianę ręki odpowiednio co jeden (blok II) lub dwa wpisywane znaki (blok III). Z tak powstałej listy słów wybrano te, które zdaniem autora powinny być znane osobom biorącym udział w eksperymencie. Celem selekcji było zminimalizowanie prawdopodobieństwa popełnienia błędów wynikających z nieznamomości danego słowa i jego błędnego odczytania.

Lista wyrazów wykorzystana do budowy bloku II liczyła 4750 pozycji. Każde ze słów złożone było z liter występujących w języku polskim. Wyjątek od tej reguły stanowiły słowa „puste” (niezawierające żadnych liter) w liczbie 100. Zadaniem pozycji pustych było zmniejszenie liczby wyrazów (a co za tym idzie – liczby bigramów) rozpatrywanych w modelu optymalizującym tekst bloku II. Dokładne omówienie zastosowania pozycji pustych przedstawiono w opisie zaproponowanego modelu optymalizacji doboru tekstu. Na potrzeby przeprowadzenia optymalizacji treści litery niewystępujące w słowach języka polskiego („Q”, „X” oraz „V”) potraktowane zostały w sposób analogiczny jak znaki wymienione w tabeli 1.

W celu zmniejszenia długości tekstu przepisywanego przez każdego z badanych autor wprowadził podział na trzy warianty treści bloku, które były losowo przydzielane kolejnym uczestnikom. Jednocześnie wszystkie trzy treści stanowią komplementarną całość ze względu na uzyskiwane wyniki – określona kombinacja dwuliterowa powinna była wystąpić minimum raz w jednym dowolnym bloku. Dlatego też rezultaty osiągane z wykorzystaniem wszystkich trzech wariantów analizowano łącznie, co pozwoliło zgromadzić pełne informacje dotyczące pisania naprzemiennego.

Do rozwiązywania przedstawionego problemu zastosowano optymalizację wielokryterialną z wykorzystaniem metody ważonej funkcji kryteriów, opisaną m.in. przez Sawikę [1998].

Do doboru słów dla sekcji zasadniczej bloku II wykorzystany został przedstawiony dalej model.

Model 1. Optymalizacja doboru słów dla bloku II

Oznaczenia zmiennych:

- W – zbiór wyrazów;
- K – zbiór dwuliterowych kombinacji pisanych obiema rękami;
- KS – zbiór dwuelementowych kombinacji składających się z litery i spacji;
- Zz – zbiór obejmujący znaki „. ”, „, ”, „; ”, „? ”, „[”, „] ”, „' ”, „? ”, „< ”, „> ”, „: ” oraz litery niewystępujące w języku polskim: „Q”, „X” i „V”;
- L – liczba liter alfabetu języka polskiego; $L = 32$;
- Ll – liczba liter pisanych lewą ręką; $Ll = 18$;
- Lp – liczba liter pisanych prawą ręką; $Lp = 14$;
- RK – liczność zbioru K ; $RK = (Ll \cdot Lp) \cdot 2 = 504$;
- RKS – liczność zbioru KS ; $RKS = L \cdot 2 = 64$;
- Rp_t – liczba liter lub znaków (Zz) pisanych prawą ręką w zbiorze wyrazów t ;
- Rl_t – liczba liter lub znaków (Zz) pisanych lewą ręką w zbiorze wyrazów t .

Zmienne decyzyjne:

$$wW_{11}, \dots, wW_{TR}$$

gdzie:

- wW_{tr} – r -ty element t -tego zbioru wyrazów, $wW_{tr} \in WW_t$;
- WW_t – t -ety zbiór wybranych w ramach optymalizacji wyrazów, gdzie $WW_t \subset W$;
- t – numer zbioru wyrazów, gdzie $t = 1, \dots, T$;
- r – numer elementu w zbiorze WW_t , gdzie $r = 1, \dots, R$;
- $T = 3$;
- $R = 55$.

$$x_i = \begin{cases} 0 - \text{jeżeli } i\text{-ta kombinacja wystąpiła w minimum dwóch zbiorach } WW_t \\ 1 - \text{jeżeli } i\text{-ta kombinacja nie wystąpiła w minimum dwóch zbiorach } WW_t \end{cases}$$

gdzie x_i – zmienna binarna służąca do sprawdzenia, czy i -ta kombinacja wystąpiła w dowolnym zbiorze WW_t .

$$y_i = \begin{cases} 0 - \text{jeżeli } i\text{-ta kombinacja wystąpiła w minimum dwóch zbiorach } WW_t \\ 1 - \text{jeżeli } i\text{-ta kombinacja nie wystąpiła w minimum dwóch zbiorach } WW_t \end{cases}$$

gdzie y_i – zmienna binarna służąca do sprawdzenia, czy dana kombinacja wystąpiła w minimum dwóch zbiorach WW_t .

Funkcja celu:

$$FC = 6 \cdot F_1 + 3 \cdot F_2 + F_3 \rightarrow \min$$

$$F_1 = \sum_{i \in K} x_i$$

$$F_2 = \sum_{i \in K} y_i$$

$$F_3 = \sum_{t=1}^T \left[\left(\sum_{i \in K} \sum_{j=RK_i}^{j=2} (j-1) \right) + \left(\sum_{i \in KS} \sum_{j=RKS_i}^{j=3} (j-2) \right) \right]$$

gdzie:

RK_k – liczba wystąpień k -tej kombinacji w zbiorze WW_t ;

RKS_{ks} – liczba wystąpień ks -tej kombinacji w zbiorze WW_t .

Ograniczenia:

$$|Rp_t - Rl_t| \leq 1$$

$$x_i \in \{0, 1\}$$

$$y_i \in \{0, 1\}$$

Zmienne decyzyjne w zaprezentowanym modelu odpowiadają pojedynczym wyrazom wybranym ze zbioru wszystkich wyrazów spełniających warunek naprzemienności pisania. Zmienne podzielono na trzy zbiory, każdy o mocy równej 55. Liczba 55 została wyznaczona w wyniku przeprowadzonych testów dotyczących sprawdzenia wpływu liczby wyrazów w każdym zbiorze na wartość funkcji celu. Zaznaczyć należy, że do zbioru wszystkich wyrazów dodano 100 pozycji pustych, czyli pozycji niezawierających żadnych słów. Ich zadaniem było zmniejszenie liczby wyrazów w dowolnym z trzech zbiorów – wybór pozycji pustej tożsamy jest ze zmniejszeniem liczby wyrazów w danym zbiorze o jeden, co tym samym umożliwiło dynamiczną zmianę liczby wybieranych wyrazów. Pozycje puste zostały także wykorzystane do wyznaczenia wspomnianej mocy zbiorów – przy zwiększaniu mocy zbiorów powyżej wartości 55 większa liczba elementów zbioru zawierała pozycje puste. Maksymalna liczba elementów niepustych wyniosła 55. Wprowadzenie takiego ograniczenia wpłynęło na zmniejszenie czasu obliczeń i był to główny powód jego zastosowania.

W zaprezentowanym modelu funkcja celu stanowi ważoną sumę trzech funkcji. Zadaniem pierwszej z nich (F_1) jest maksymalizacja liczby różnych, dwuelementowych kombinacji pisanych obiema rękami. Brak którejkolwiek z możliwych kombinacji powoduje zwiększenie funkcji celu o sześć. Druga funkcja (F_2) sprawdza, czy dana kombinacja pojawiła się w minimum dwóch różnych zbiorach wyrazów. Zdublikowanie danej kombinacji miało na celu minimalizację wpływu otaczających ją (w ramach wyrazu) liter, jak również zebranie danych niezbędnych do porównania prędkości pisania danej

kombinacji przez dwie uczestniczące w badaniu osoby charakteryzujące się analogicznymi (określonymi za pomocą opisanej listy pytań) cechami. Również ze względu na minimalizację długości tekstu eksperymentu kombinacja pojawia się w różnych blokach. Ostatnim składnikiem sumy jest funkcja F_3 , której celem jest minimalizacja liczby wystąpień tych samych kombinacji w jednym zbiorze wyrazów (stanowiących pojedynczy wariant treści bloku II). Dopuszczalna jest jedynie określona liczba wystąpień danej kombinacji – każde następne wiąże się z karą liczoną zgodnie z zaprezentowanym wzorem:

- dla kombinacji literowych: niekarane jest tylko pojedyncze wystąpienie danej kombinacji;
- dla kombinacji litery i spacji: karze nie podlega maksymalnie dwukrotne wystąpienie danej kombinacji.

Wszystkie wystąpienia kombinacji powyżej określonego limitu wiążą się z karą – dla jednego (ponad limit) kara wynosi jeden, dla drugiego – trzy ($1 + 2$), dla trzeciego – sześć ($1 + 2 + 3$) itd. Ze względu na zaprezentowaną konstrukcję funkcji jej waga w funkcji celu wynosi jeden (kara dla każdej kombinacji jest ważona wewnątrz opisywanej funkcji). Zaprezentowana metoda liczenia wartości funkcji trzeciej ma na celu zrównoważenie liczby kombinacji, które wystąpiły w tekście większą liczbę razy niż wynosił zakładany limit.

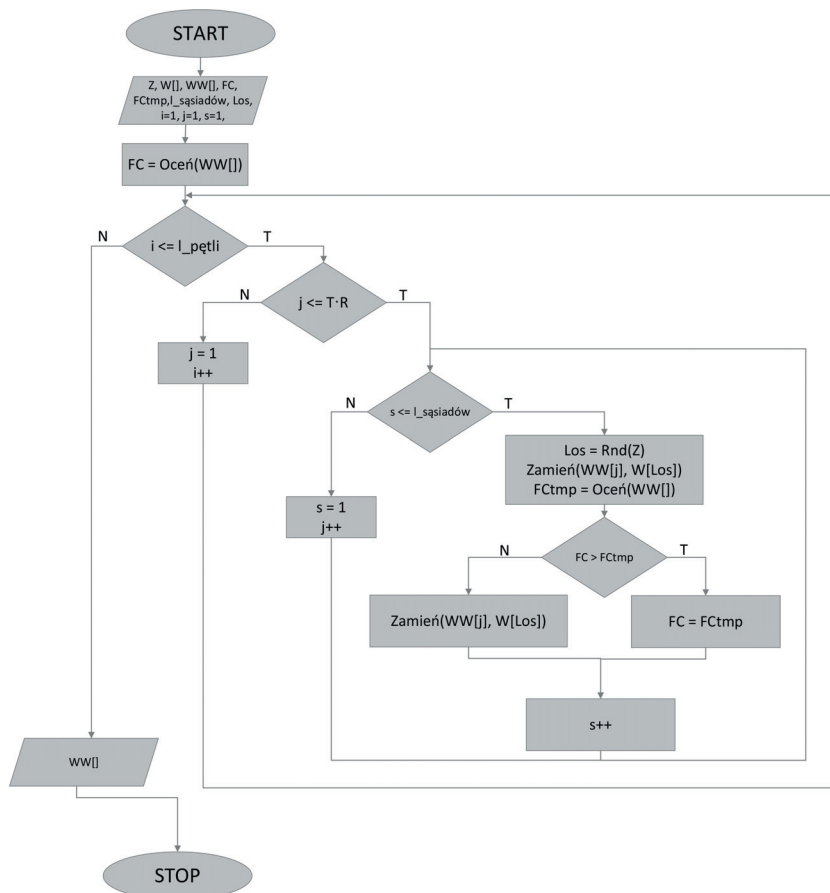
Wagi dla składników funkcji celu zostały dobrane w następujący sposób:

- wystąpienie możliwie największej liczby kombinacji jest najistotniejsze dla wiarygodności wyników eksperymentu, dlatego waga pierwszej funkcji jest najwyższa i odpowiada m.in. możliwości wystąpienia (ponad limit): do trzech takich samych kombinacji lub sześciu różnych kombinacji celem umożliwienia wystąpienia jednej kombinacji niewystępującej w zbiorach wyrazów bloku II;
- zduplikowanie kombinacji w różnych wariantach bloku III jest mniej istotne niż wystąpienie wszystkich kombinacji, dlatego waga funkcji drugiej jest niższa niż pierwszej i odpowiada m.in. maksymalnie dwóm dodatkowym (ponad limit) kombinacjom.

Opisany dobór wag miał na celu umożliwienie zawarcia w tekście opisanych kombinacji, nawet jeżeli wiąże się to z duplikowaniem kombinacji już występujących. Jednocześnie wysokość kary za duplikowanie kombinacji (funkcja trzecia) odpowiadająca „kosztowi” zawarcia kolejnej takiej samej kombinacji jest ograniczona do wielkości wagi przypisanej danej funkcji odpowiadającej „zyskowi” z dodania danej kombinacji.

Ze względu na złożoność obliczeniową opisanego modelu (liczbę wszystkich możliwych do utworzenia grup można zapisać przy użyciu dwumianu Newtona i wynosi ona $4850!/[165! \cdot 4685!]$) do jego rozwiązania wykorzystany został algorytm heurystyczny [Sörensen, Glover 2013]. Autor zdecydował się w tym celu wykorzystać algorytm wspinaczki (*hill climbing algorithm*) [Bonet, Geffner 2001]. Ponieważ algorytm dopuszcza jedynie przyjmowanie rozwiązań nie gorszych od obecnego, możliwe jest znalezienie rozwiązania będącego minimum lokalnym. W celu maksymalizacji prawdopodobieństwa odnalezienia minimum globalnego algorytm został uruchomiony

wielokrotnie z losowymi punktami startowymi (tzw. strategia wielostartu, opisana m.in. przez Trojanowskiego [2005]). Schemat blokowy wykorzystanego algorytmu zaprezentowano na rysunku 114.



Oznaczenia:

- LW – moc zbioru W (liczność zbioru wszystkich wyrazów),
- $Rnd(Z)$ – funkcja losująca wartość całkowitą z przedziału od 1 do Z ,
- Z – liczba wszystkich wyrazów (LW) pomniejszona o długość wektora WW zawierającego zmienne decyzyjne ($Z = LW - T \cdot R$),
- $W[Z]$ – wektor zawierający zbiór wszystkich wyrazów z wyłączeniem wyrazów w wektorze, $WW[T \cdot R]$ – wektor zawierający zmienne decyzyjne – wyrazy dla których liczona jest funkcja celu
- FC – wartość funkcji celu,
- $FCtmp$ – zmienna służąca do przechowywania tymczasowej wartości funkcji celu,
- l_petli – zmienna określająca liczbę sąsiedztw sprawdzanych dla każdego elementu wektora zmiennych decyzyjnych,
- $l_sasiadow$ – zmienna oznaczająca liczbę elementów sprawdzanych w ramach sąsiedztwa dla każdego elementu wektora zmiennych decyzyjnych,
- los – zmienna, do której zapisywana jest wartość losowa,
- i, j, s – liczniki iteracji,
- $Zamien(W1[a], W2[b])$ – funkcja zamieniająca element a wektora $W1$ z elementem b wektora $W2$,
- $Ocen(WW[])$ – funkcja obliczająca wartość funkcji celu dla wektora WW .

Rys. 114. Schemat blokowy algorytmu wspinaczki

Nieopisane na schemacie algorytmu zmienne są analogiczne do zaprezentowanego modelu optymalizacji. Pierwszym krokiem w algorytmie jest wczytanie dwóch wektorów: pierwszego zawierającego wyrazy, dla których liczona jest wartość funkcji celu, oraz drugiego z pozostałymi wyrazami. Następnie obliczona zostaje funkcja celu dla wektora pierwszego. Kolejnym krokiem działania algorytmu jest iteracyjne losowanie sąsiedztwa dla kolejnych zmiennych decyzyjnych i sprawdzanie, czy w wyniku zamiany wyrazów pomiędzy wektorami funkcja celu nie uległa zwiększeniu. Jeżeli wartość funkcji celu wzrosła, dokonywana jest powrotna zamiana wyrazów pomiędzy wektorami. W pozostałych przypadkach obecna wartość funkcji celu zostaje zapisana. Operacje te (losowanie sąsiedztwa, zamiana wyrazów, obliczanie wartości funkcji celu) są następne powtarzane określoną liczbę razy (*l_pętli*).

Najlepsze z otrzymanych w wyniku działania zaprezentowanego algorytmu rozwiązań przedstawiono w tabeli 2. Funkcja celu dla tego rozwiązania wyniosła 2274.

Tabela 2
Wyrazy sekcji zasadniczej bloku II

Numer wyrazu	Numer zbioru (<i>T</i>)		
	1	2	3
1	cłem	woal	ibis
2	hen	uzi	jeńców
3	diament	heksy	sofizm
4	mgle	rybna	woźnej
5	bużką	kent	goguś
6	osóbkę	neogotycka	menzurka
7	żywot	dyżurne	dyfuzje
8	uduś	firmę	ósmą
9	dozór	chwył	palcu
10	próg	sorpcję	ryb
11	syfów	bug	ciżmę
12	wygódka	zlep	usidlę
13	tico	ambitną	wywóz
14	autofocus	akcyzo	łajzów
15	mżyć	ciao	najchciwiej
16	lwic	pąk	utkwia
17	ryżowych	boćka	kei
18	girland	ćpań	gify

Tabela 2 cd.

Numer wyrazu	Numer zbioru (T)		
	1	2	3
19	odjęła	hanzy	bląkań
20	cif	sprośne	sód
21	urn	rozjemców	rytuał
22	hałdy	toż	pepek
23	gibnął	orłem	haubic
24	sobótkę	kap	któż
25	łajbo	elf	audi
26	wózka	dowóz	lżyć
27	kwizu	mdlałbyś	odmrugnąłby
28	naiwne	id	dób
29	wyrósł	usnął	tłamś
30	igłą	gyros	akcja
31	blahą	łęk	skróć
32	ćmą	wiślan	flamenco
33	ufnej	wudu	alg
34	suwu	objął	lansu
35	wlep	źle	elfką
36	blamanzów	islamską	euforia
37	alboż	ptyś	żużlem
38	amfy	flejtuch	psoć
39	odpełził	jajcu	zośkę
40	najsuchsi	gubią	ocłą
41	cieńsi	zmruż	rożnem
42	dnę	yamahe	eh
43	mroź	odprysł	chrobot
44	furię	uwić	mdle
45	ekspansją	napsuć	tygle
46	peptyd	sigm	ślepcy
47	jakbyś	rózo	wpełził
48	kryzys	żydów	znajdo
49	form	gór	mgłę

Tabela 2 cd.

Numer wyrazu	Numer zbioru (T)		
	1	2	3
50	rozpruć	siakti	slang
51	lęk	małż	bitmap
52	zhańbić	altówkę	
53	zielsk	tłą	
54		łgnęła	
55		bóg	

Na podstawie zamieszczonych w tabeli 2 wyrazów (uzupełnionych m.in. o znaki przestankowe oraz litery niewystępujące w polskim alfabecie) stworzone zostały trzy warianty treści sekcji zasadniczej bloku II:

– wariant I:

Ekspansją lęk blamanżów odpelzł bużką jakbyś igłą próg kwizu błahą odjęła. Wygódka peptyd Naiwne hałdy syfów; cif osóbkę Łajbo amfy zhańbić hen ryżowych girland, zielsk alboż Urn sobótkę uduś: Autofocus [żywoť] gibnął diament'q? Tico ćmą ufnej suwu wyrósł dozór. Cieńsi x/v; wlep furię lwic najsuchsi cłem wózka mroź; rozpruć mgle kryzys, form dnę mżyć.

– wariant II:

Bóg usnął toż ptyś objął wudu boćka. Wiślan chwyt Hanzy gubią; tłą yamahę heksy rozjemców? żydów małż Orłem zmrz. Elf Uzix napsuć pāk sigm altówkę id'v [firmę/q] Zlep gyros; ambitną uwić lęk gór Jajcu rybna neogotycka kent, dyżurne islamską odprysł Dowóz káp sorpcję: Siakti woal rózo sprośne łgnęła, ciao Bug; akcyzo ćpań fletuch źle mdlałyś.

– wariant III:

Goguś jeńców najchciwiej tłamś usidlę Ósmą haubic; akcja Któż pępek woźnej różnem dyfuzje. Flamenco elfką utkwiaŁansu euforia mdle palcu ślepcy ryb? Rytuał audi żużlem wpełzł ciżmę łajzów, alg odmrugnąłby chrobot kei ehq psoć Menzurka [sofizm skróć] slang oclą/wywóz mgłę Ibis. Znajdo błakań gify bitmap tygle; zośkę lżyć: V'x, dób; sód.

Wykorzystując model wzorowany na opisanym Modelu 1 (zmodyfikowany przez usunięcie z funkcji celu składnika F_2), wybrano wyrazy dla sekcji wstępnej bloku II. Ich liczba została ograniczona do 15 dla każdego z trzech wariantów. Zbiór słów, na podstawie którego dokonywana jest selekcja, pomniejszono o wyrazy wybrane do sekcji zasadniczej. Wyrazy, dla których wartość funkcji celu osiągnęła wartość minimalną (1729), zaprezentowano w tabeli 3.

Tabela 3
Wyrazy sekcji wstępnej bloku II

Numer wyrazu	Numer zbioru (T)		
	1	2	3
1	girlandy	zubożyć	wódkę
2	mdlejcie	napsoć	bląkałbyś
3	butlę	rozpełzł	cizią
4	woźne	wyrósłbyś	dyżurna
5	algorytm	docisną	próżne
6	ekspansje	yamahą	osóbką
7	ogórka	kryzysu	ślepców
8	mgłą	cofnęła	usidlań
9	cizmą	fuzję	akcyzowych
10	rozkwitłem	slangu	uwielbiają
11	sobótką	igłę	amfibię
12	żydówkę	aktywnej	flejtuchem
13	odmrugnął	fotoelement	skąpą
14	dużo	zhańbicie	rozmaić
15	audiencja	syfy	obleńcu

Z wykorzystaniem zaprezentowanego w tabeli 3 zbioru wyrazów (z uwzględnieniem m.in. znaków przestankowych oraz liter „Q”, „X” oraz „V”) powstały następujące warianty sekcji wstępnej bloku II:

– wariant I:

Mdlejcie, Butlę, ekspansje [girlandy woźne] sobótką'q <Algorytm rozkwitłem x/v>
Żydówkę mgłą. audiencja odmrugnął cizmą ogórka; dużo

– wariant II:

Napsoć <Cofnęła igłę> rozpełzł fotoelement; fuzję kryzysu zhańbicie. Zubożyć/x
[docisną] slangu q'v; wyrósłbyś yamahą, aktywnej syfy

– wariant III:

Próżne <dyżurna osóbką> wódkę [akcyzowych rozmaić] flejtuchem bląkałbyś. Amfibię;
X'cizią, skąpą uwielbiają/q usidlań Vobleńcu ślepców.

Blok III

Model doboru słów dla bloku III jest w znacznej mierze analogiczny do zaprezentowanego modelu dla bloku II (dotyczy to także oznaczeń zmiennych). Z tego też względu w dalszej części opracowania opisane zostały jedynie różnice pomiędzy modelami.

Model doboru słów dla sekcji zasadniczej bloku III przedstawiono w dalszej części opracowania.

Model 2. Optymalizacja doboru słów dla bloku III

Oznaczenia zmiennych:

$K2$ – zbiór dwuliterowych kombinacji pisanych jedną ręką;

K' – zbiór wszystkich dwuliterowych kombinacji;

RK' – liczność zbioru K' ;

RK'_k – liczba wystąpień k -tej kombinacji w zbiorze WW_t ;

$R = 55$;

$RK' = (Ll \cdot Ll) \cdot (Lp \cdot Lp) = 520$.

Zmienne decyzyjne:

$wW_{11}, \dots, wW_{TR}$

$$x_i = \begin{cases} 0 - \text{jeżeli } i\text{-ta kombinacja wystąpiła w dowolnym zbiorze } WW_t \\ 1 - \text{jeżeli } i\text{-ta kombinacja nie wystąpiła w dowolnym zbiorze } WW_t \end{cases}$$

Funkcja celu:

$$FC = 6 \cdot F_1 + 3 \cdot F_2 + F_3 \rightarrow \min$$

$$F_1 = \sum_{i \in K2} x_i$$

$$F_2 = \sum_{i \in K} x_i$$

$$F_3 = \sum_{t=1}^T \left[\left(\sum_{i \in K'} \sum_{j=RK_i}^{j=2} (j-1) \right) + \left(\sum_{i \in KS} \sum_{j=RKS_i}^{j=4} (j-2) \right) \right]$$

Ograniczenia:

$$|Rp_t - Rl_t| \leq 2, t = 1, \dots, T$$

$$x_i \in \{0, 1\}$$

W zaprezentowanym modelu doboru słów dla bloku III liczba wyrazów, z których wybierano, wyniosła 2013. Analogicznie jak w przypadku bloku II lista słów została

powiększona o 100 pozycji pustych. Zbiór rozpatrywanych kombinacji dwuliterowych rozszerzono o kombinacje pisane tą samą ręką. Ponieważ blok II miał służyć zbadaniu zależności pomiędzy kombinacjami wymuszającymi zmianę ręki, w bloku III wagę funkcji, której celem jest wymuszanie jak największej liczby różnych kombinacji pisanych różnymi rękami, zmniejszono do trzech (funkcja F_2). Niezmieniona została waga funkcji pierwszej (F_1), która w bloku III odpowiada za zmaksymalizowanie liczby różnych kombinacji pisanych jedną ręką.

Rozwiązanie cechujące się najniższą wartością funkcji celu (2800) zaprezentowano w tabeli 4.

Tabela 4
Wyrazy sekcji zasadniczej bloku III

Numer wyrazu	Numer zbioru (T)		
	1	2	3
1	depnąć	wzniećmy	wżynać
2	czół	dęli	czknać
3	schleś	ario	geoida
4	esik	grupce	zsyłce
5	ramp	wrył	aż
6	zwilżą	rwijże	ballad
7	dalmatyńczyk	wapń	trójcą
8	zrypać	czyjeż	zzuleś
9	wślizg	fajową	druh
10	sejm	broń	wtłocz
11	bank	żbik	stóp
12	talk	tępy	remizą
13	zemleć	zakłęć	czyjąż
14	fruńże	całkach	faun
15	wgnietli	ćwokach	wskórał
16	stolarń	bajpasy	zblizeń
17	bzu	dął	dzióbek
18	twojego	swojscy	sęk
19	cennego	ten	egipscy
20	dwu	rań	sznycel

Tabela 4 cd.

Numer wyrazu	Numer zbioru (T)		
	1	2	3
21	rzy	szylde	tajnego
22	gwintem	szpitalnego	gdy
23	fajkach	żał	bąk
24	feniccy	zgłosek	aby
25	sęp	gai	świńscy
26	dżokery	fan	tchórzliwej
27	węlnach	łódź	zamkach
28	admiral	opra	lift
29	morsom	hubę	imbryk
30	jogę	nurtując	kowboj
31	piątku	morduj	niezmyte
32	ulgą	podbój	podsuń
33	moczopędny	mięśny	kitą
34	onże	pozwól	ujawnisz
35	klębił	hm	niewyjętym
36	niedługa	kuśtykać	łudź
37	podgól	koafiura	hufcom
38	miss	muze	iksa
39	hydr	kusą	porcji
40	ujde	niedoleżność	hostii
41	oheblowano	uiściłaś	okazjo
42	ulec	luff	łyżwom
43	lobbuj	lottomat	kofein
44	jure	pląs	mówcom
45	huta	ulżę	umrę
46	pożryj	pleśniawki	płatność
47	plag		mowę
48	łyśa		nucę
49	korbki		operki
50	pufą		ukąś
51			pięciu

Poniżej przedstawione zostały trzy warianty treści sekcji zasadniczej bloku III, powstałe na podstawie tabeli 4:

– wariant I:

Sejm zrypać plag Morsom rzy; dalmatyńczyk fruńże ulec pufą ujdę korbki wełnach, Czół Esik talk ramp Bzu, zwilżą moczopełny fajkach; wślizg ulgą piątku dzokery. Depnąć Jurę niedługa Onże Kłębił gwintem? schleś łyśa huta podgól dwu, sęp'qx oheblowano stolarń: bank twojego[cennego/vv lobbuj feniccy] wgnetli jogę hydr Pożryj admirał. Zemleć miss.

– wariant II:

Wznieśmy broń fajową pozwól tępy Gai, czyjeż pleśniawki swojscy. Wrył bajpasy, szpitalnego; rwijże kusą Hubę nurtując lottomat podbój Ten. Zgłosek'qq ulżę mięsny fan[żał] ćwokach? Dą/xv muzę morduj Szyldeń: dęli wapń grupce płas oprą łódź hm całkach; żbik ario rań, zakłęcz uściłaś kuśtykać Niedoleżność luff koafiura.

– wariant III:

Łyżwom czyjż kitą pięciu stóp wżynać porcji zbliżeń? geoida hostii trójcą kowboj wskórał; Wtłocz imbryk gdy: zżuleś kofein dzióbek. Ballad nucę operki Faun czknać mówcom bą'xx niewyjętym sęk. Zsyłce ujawnisz umrę okazjo Aby, aż łudź Iksa niezmyte hufcom druh tajnego[vq egipscy] zamkach; tchórzliwej/sznychel, Remizą płatność ukąś mowę Lift podsuń świńscy.

Po ograniczeniu liczby zmiennych decyzyjnych do 15 dla każdego z wariantów wybranych zostało 45 wyrazów, które wykorzystano do stworzenia sekcji wstępnej bloku III. W obliczeniach uwzględniono 1866 wyrazów (zbiór 2013 wyrazów pomniejszono o 147 wyrazów użytych w sekcji zasadniczej). W tabeli 5 zaprezentowano rozwiązanie, dla którego funkcja celu osiągnęła wartość najmniejszą (3449).

Wykorzystując wyrazy zawarte w tabeli 5, zaproponowano następujące warianty sekcji wstępnej bloku III:

– wariant I:

Zakłęty, grymasi[dwuletniego] bąknąć uprzykrzył swojego'qv kłębki zwilżał <Wzmoga płazińce nudźmy tchórz> saunach/xv hugenota pozbijać

– wariant II:

Frontalnego[zapuścmy trójczynach] brukselkach <oheblowany fajowej'vx pistolecik gailaby> Płasom szpyrek/xq niewypadli deportujący, koafiurami zsuńże wślizgnięć

– wariant III:

Stłuczonego <zainfekował[vq poezji srokaty] bańkach> Schodziłeś mlaśnięciu całościowej'qx oparty wskutek/druida lubemu tępiący; Zelmer niedoleżnić

Tabela 5
Wyrazy sekcji wstępnej bloku III

Numer wyrazu	Numer zbioru (<i>T</i>)		
	1	2	3
1	uprzykrzył	trójczynach	bańkach
2	dwuletniego	bruksełkach	zelmer
3	saunach	wślizgnięć	zainfekował
4	zwilżał	zsuńże	całościowej
5	zakłęty	zapuśmy	srokaty
6	tchórze	frontalnego	schodziłeś
7	grymasi	fajowej	młasińcui
8	swojego	deportujący	lubemu
9	hugenota	pistolecik	oparły
10	nudźmy	gałaby	poezji
11	pozbijać	pląsom	stłuczonego
12	bąknąć	oheblowany	wskutek
13	plazińce	koafurami	niedołężnieć
14	wzmogą	szpyrek	tępiący
15	kłębki	niewypadli	druida

Blok IV

Treść bloku IV (w przeciwieństwie do poprzednich bloków) zawiera także znaki położone w rzędzie numerycznym. Podstawowym celem tego bloku było zbadanie wpływu wykorzystania klawiszy rzędu numerycznego i czasu dostępu do nich. Z tego też względu w tym bloku zoptymalizowano liczbę unikalnych, dwuelementowych kombinacji cyfr, przy założeniu ograniczonej liczby występujących w bloku cyfr. Dodatkowo nałożone zostało ograniczenie wymuszające równomierną liczbę wystąpień kombinacji dla każdej z cyfr. W celu zminimalizowania prawdopodobieństwa wystąpienia opóźnień podczas przepisywania treści bloku IV związanych z odczytywaniem złożonych liczb przyjęto ograniczenie, zgodnie z którym maksymalna długość liczb wynosi pięć cyfr. Optymalizacji nie podlegały kombinacje znaków nienumerycznych wykorzystanych w celu przygotowania możliwie spójnej i poprawnej treści bloku.

Sekcja wstępna bloku IV brzmiała następująco:

Przepis (065) na 179 porcji [34 g.] & 28 osób, tylko 73% tłuszczu! #tp-@kod61

Sekcja zasadnicza zaprezentowana została poniżej:

Dodaj 90349 g. mąki, 67353 soi, 8120 oleju, 47184 powideł! Wagę 09962 otrzymasz po dolaniu 15264 wody & 27601 jajek po 0,741\$ czyli 5839 zł. Łączny koszt to $7723 \cdot 944$ (węgiel) + $8869/370$ (dowóz) – $9225 \cdot 563$ (zboże) = 511,07 na 138 osób, czyli $4805/982$ = 400^{14} przez 368 dni w 59 lat z oprocentowaniem 0,55%. #przepis_N@to

2.2. Podsumowanie

Celem zaprezentowanego w niniejszym rozdziale projektu było m.in. uzyskanie informacji dotyczących zależności pomiędzy położeniem danego klawisza i czasem niezbędnym do jego użycia. Podział treści eksperymentu na bloki umożliwił weryfikację jednego z kluczowych i najczęściej pojawiających się w literaturze kryterium optymalizacji, jakim jest naprzemiennność pisania. Zbadany został także wpływ wymuszania zmiany rąk co dwa wpisywane znaki. Punktem odniesienia dla otrzymanych wyników były rezultaty z bloku I, w którym nie wymuszano zmiany rąk z założoną z góry częstotliwością. Blok I stanowi także punkt odniesienia dla analizy wpływu zastosowania specyficznej, nie zawsze poprawnej gramatycznie składni pozostałych bloków. Wyniki badania ankietowego pozwoliły także na pozyskanie informacji o subiektywnej ocenie trudności dostępu do danego klawisza.

Celem zaproponowanego eksperymentu było uzyskanie danych empirycznych, na podstawie których możliwe byłoby zbudowanie modelu optymalizacji rozmieszczenia znaków na klawiaturze. Opis realizacji eksperymentu oraz otrzymane na jego podstawie wyniki stanowią kolejną część niniejszego opracowania.

3. Wyniki badania empirycznego

W niniejszym rozdziale zawarto opis przeprowadzonego eksperymentu wraz z analizą jego wyników. Opis ten został podzielony na trzy części:

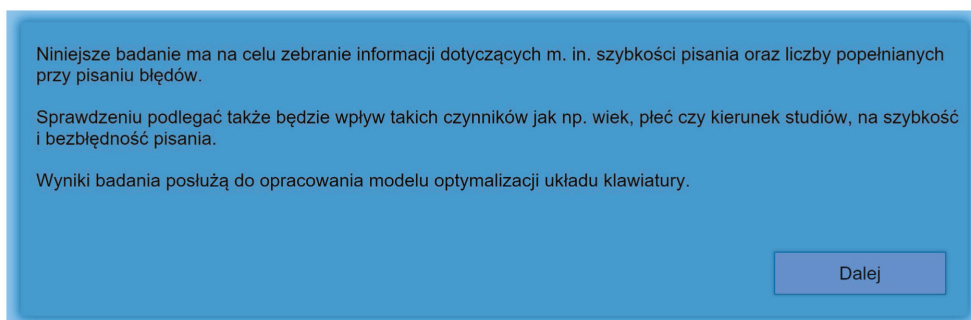
1. Opis technik, które zostały wykorzystane do przeprowadzenia eksperymentu i zebrania danych.
2. Podstawowe charakterystyki uczestników badania.
3. Analiza wyników przeprowadzonego eksperymentu.

Każdy z wymienionych elementów będzie przedmiotem jednego z podrozdziałów niniejszego rozdziału.

3.1. Techniki wykorzystane w badaniu empirycznym

Omówione w poprzednim rozdziale badanie zostało zaimplementowane przy wykorzystaniu technik internetowych, takich jak HTML, CSS, PHP oraz JS. Wyniki badania wpisywane były do bazy danych Microsoft SQL.

Pierwszym krokiem było przedstawienie osobom biorącym udział w eksperymencie celu badania. Informacje, które zostały przekazane uczestnikom eksperymentu, zamieszczono na rysunku 115.



Rys. 115. Ogólne informacje dla uczestników eksperymentu

Drugim etapem eksperymentu było wypełnienie przez uczestników ankiety dotyczącej charakterystyki danej osoby. Na rysunku 116 został zaprezentowany formularz badania ankietowego.

1. Podaj datę urodzenia:

2. Kierunek studiów:

3. Rok studiów:

4. Płeć: ☐ Kobieta ☒ Mężczyzna

5. Lateralizacja rąk:

6. Liczba wykorzystywanych do pisanja palców (nie licząc kciuków):

7. Na co dzień wykorzystywany układ klawiatury:

8. Rodzaj komputera wykorzystany do przeprowadzenia badania:

Rys. 116. Formularz badania ankietowego

Kolejnym krokiem badania było przedstawienie treści każdego z bloków. Każdorazowo treść danego bloku była prezentowana w celu zapoznania się uczestnika eksperymentu z tekstem, który na kolejnym etapie miał zostać przez niego przepisany. Na rysunkach 117 oraz 118 zaprezentowano opisane kroki dla jednego przykładowego bloku tekstu.

Zapoznaj się z poniższym tekstem. Po uważnym przeczytaniu całości wciśnij przycisk Dalej, który przekieruje Cię do następnego kroku, jakim jest przepisanie poniższej treści.

Zakłęty, grymasi[dwuletniego] bąknąć uprzykrzył swojego'qv kłębki zwilżał. Wzmogą plaźnińce nudźmy tchórz; saunach/xv hugenota pozbijać

Sejm zrypać plag morsom rzy Czół esik talk ramp bzu, zwilżą moczopędny fajkach; wślżig ulgą piątku dżokery. Depnąć jurę niedługa onże kłębił gwintem? schleś tyśa huta podgól dwu, sęp'qx oheblowano stolarń: bank twojego[cennego/vv lobbuży feniccy] wgnietli jogę hydr pożryj admirał. Zemleć miss.

Rys. 117. Widok strony służącej do zapoznania się z treścią, którą na następnym etapie należy przepisać

Przepisz poniższy tekst do pola znajdującego się poniżej.

Zakłęty, grymasi[dwuletniego] bąknąć uprzykrzył swojego'qv kłębki zwilżał. Wzmogą plaźńce nudźmy tchórzcu; saunach/xv hugenota pozbijać

Sejm zrypać plag morsom rzy Czoł esik talk ramp bzu, zwilżą moczopędny fajkach; wślizg ulgą piątku dzokery. Depnąć jurę niedługa onże kłębił gwintem? schleś tyśa huta podgól dwu, sęp'qx oheblowano stolarń: bank twojego[cennego/vv lobbuj feniccy] wgnietli jogę hydr pożryj admirał. Zemleć miss.

Dalej

Rys. 118. Formularz przepisywania treści dla przykładowego bloku tekstu

Po wpisaniu przez uczestnika wszystkich bloków tekstu kolejnym zadaniem było ocenienie subiektywnego stopnia trudności każdego z tekstów w skali od 1 (najłatwiejszy) do 5 (najtrudniejszy). Ostatnim krokiem badania było wyświetlenie uczestnikowi informacji zwrotnej w postaci średniej prędkości wpisywania treści dla każdego z bloków.

Wyniki eksperymentu były wpisywane do bazy danych. Wszystkie informacje o uczestniku badania zebrane za pomocą ankiety umieszczono w jednej tabeli. W drugiej tabeli zebrano informacje na temat czasu wpisania danego znaku z uwzględnieniem informacji takich jak:

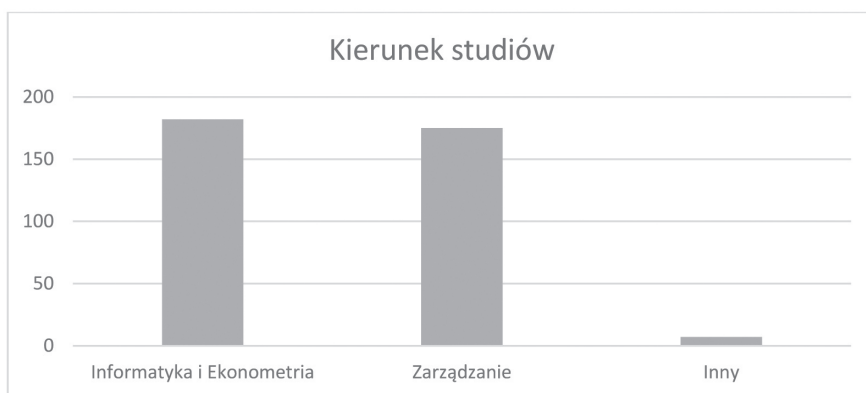
- to, jaki znak został wpisany;
- liczba do tej pory wpisanych znaków;
- ID bloku tekstu;
- ID użytkownika, który wpisał znak;
- dokładny (do milisekundy) czas wciśnięcia danego znaku;
- pozycja w tekście, na której dany znak został wpisany.

Do ostatniej tabeli zostały wpisane dane dotyczące oceny trudności poszczególnych bloków, której dokonywał każdy z użytkowników badania.

Zgromadzone we wspomnianych tabelach dane poddano analizie w kolejnych częściach niniejszego rozdziału.

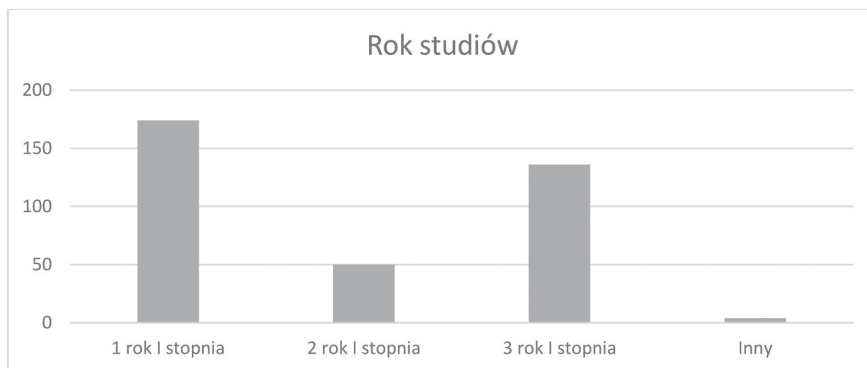
3.2. Charakterystyka uczestników badania

W eksperymencie wzięły udział 364 osoby. Zdecydowaną większość uczestników stanowili studenci kierunków informatyka i ekonometria oraz zarządzanie Wydziału Zarządzania AGH, co zaprezentowane zostało na rysunku 119.



Rys. 119. Kierunki studiów uczestników eksperymentu

Prawie wszystkie badane osoby (z wyjątkiem 4) były studentami studiów I stopnia. Podział studentów ze względu na rok studiów zaprezentowano na rysunku 120.

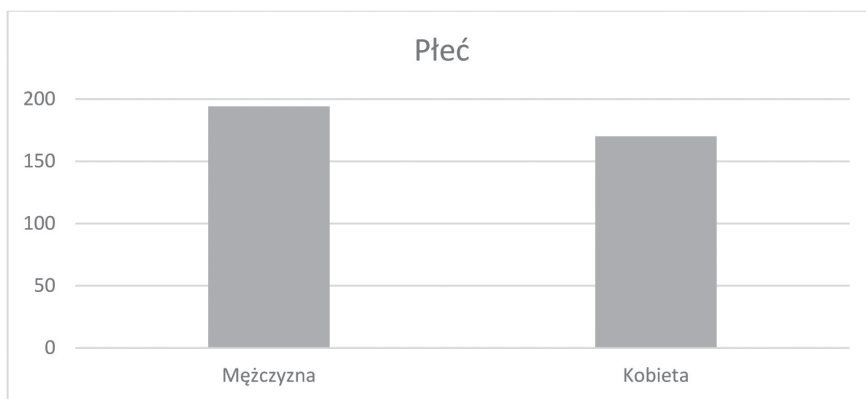


Rys. 120. Podział uczestników eksperymentu ze względu na rok studiów

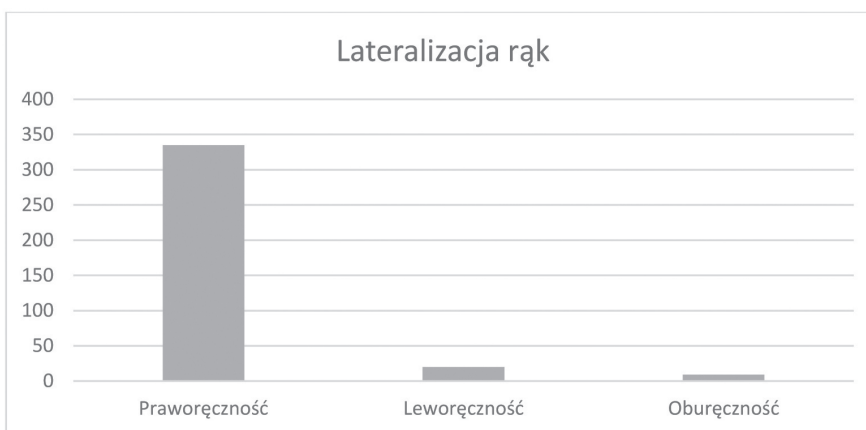
Liczba mężczyzn i kobiet biorących udział w badaniu była wyrównana, z niewielką przewagą mężczyzn, których było więcej o 24, czyli o 14% (rys. 121).

Pod względem lateralizacji rąk zdecydowana większość uczestników eksperymentu to osoby praworęczne, których było aż 92%. 20 osób zadeklarowało, że sprawniej posługuje się lewą ręką, natomiast 9 osób określiło siebie jako osoby oburęczne. Na rysunku 122 przedstawiono dane odnośnie lateralizacji rąk.

Ponad 70% uczestników badania zadeklarowało, że poza kciukami wykorzystuje do pisania 6 lub więcej palców, a ponad 1/3 badanych – że pisze wszystkimi palcami. Wyniki takie mogą świadczyć o dużej biegłości uczestników badania w pisaniu na klawiaturze. Na uwagę zasługuje również to, że uczestnicy zdecydowanie częściej deklarowali wykorzystanie do pisania parzystej liczby palców. Na rysunku 123 zaprezentowane zostały informacje dotyczące liczby osób wykorzystujących do pisania określoną liczbę palców.



Rys. 121. Podział uczestników eksperymentu ze względu na płeć



Rys. 122. Podział uczestników eksperymentu ze względu na lateralizację rąk



Rys. 123. Liczba uczestników deklarująca pisanie określoną liczbą palców

Na rysunku 124 przedstawiono podział uczestników eksperymentu ze względu na wykorzystywany układ klawiatury. Ponad 99% badanych używa na co dzień układu QWERTY. Wynik ten może potwierdzać tezę o powszechności klawiatur o takim układzie.



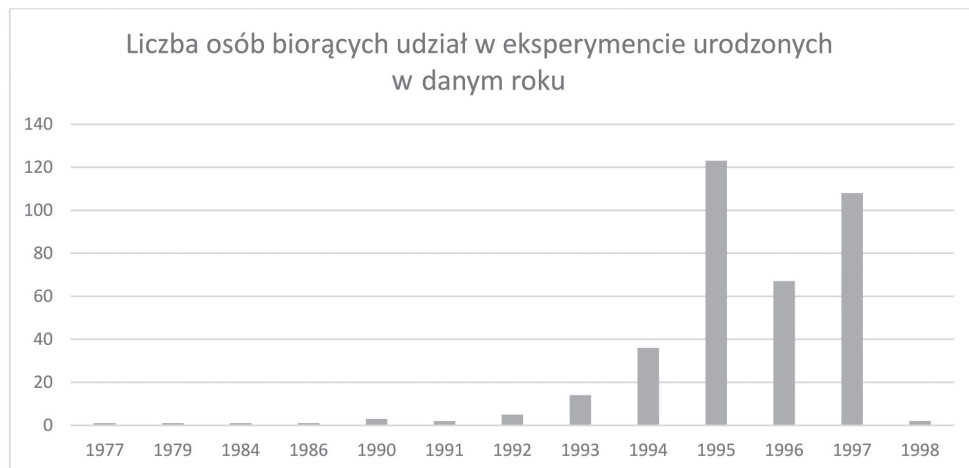
Rys. 124. Podział uczestników eksperymentu ze względu na wykorzystywany na co dzień układ klawiatury

Podział uczestników ze względu na wykorzystywany komputer (a tym samym klawiaturę służącą do przeprowadzenia eksperymentu) został przedstawiony na rysunku 125. Blisko 97% badanych brało udział w eksperymencie, korzystając z urządzeń dostępnych w laboratoriach komputerowych Wydziału Zarządzania AGH. Na tej podstawie można stwierdzić, że pod względem wykorzystanego sprzętu komputerowego zdecydowana większość osób miała podczas udziału w eksperymencie zapewnione porównywalne warunki.



Rys. 125. Podział uczestników eksperymentu ze względu na komputer wykorzystany do udziału w badaniu

Podział uczestników ze względu na datę urodzenia zaprezentowany został na rysunku 126. Ponad 80% badanych urodziło się w latach 1995–1997, a wykres liczby uczestników urodzonych w tym okresie koresponduje z wykresem prezentującym podział uczestników ze względu na rok studiów (rys. 120).



Rys. 126. Podział uczestników eksperymentu ze względu rok urodzenia

3.3. Analiza wyników eksperymentu

Niniejszy podrozdział poświęcony został przeanalizowaniu wyników eksperymentu. Pierwszym elementem tej części opracowania jest przedstawienie metody weryfikacji poprawności wpisywanych znaków. W dalszej części, na podstawie informacji o poprawnie wpisanych znakach, zostaną przedstawione charakterystyki prędkości pisania dla różnych grup użytkowników. W kolejnych częściach wyniki poddane zostaną analizie statystycznym.

3.3.1. Algorytm weryfikacji poprawności wpisanych znaków

Pierwszym krokiem do sprawdzenia, czy dany znak został poprawnie wpisany, było zakodowanie (na podstawie tabeli 1) każdego z ośmiu bloków tekstów. Zakodowane bloki stanowiły wzorce, na podstawie których dokonywana była weryfikacja poprawności wpisania danego znaku. Wzorce części wstępnej i zasadniczej posłużyły do podzielenia zebranych danych na dwie grupy odpowiadające części wstępnej i zasadniczej. Pierwsza z grup została wyłączona z dalszych analiz.

Wobbrock i Myers [2006] w swojej pracy przeanalizowali i zaklasyfikowali popełniane podczas pisania błędy. Na potrzeby niniejszego badania autor zdecydował się na opracowanie algorytmu, który został wykorzystany do weryfikacji poprawności zebranych danych części zasadniczej. Zaproponowany algorytm przebiegał następująco. Dla każdego uczestnika badania, dla każdego wpisywanego przez tego uczestnika bloku następuje weryfikacja, czy konkretny znak (Z) oraz znak go poprzedzający ($Z - 1$), a także znak następujący bezpośrednio po nim ($Z + 1$) znajdują się (dokładnie w opisanej kolejności) w treści wzorca sprawdzanego bloku. W przypadku braku takiej kombinacji znaków ($Z - 1$, Z , $Z + 1$) we wzorcu dla danego bloku wpis jest uznawany za błędny. W przypadku zgodności kombinacji znaków z wzorcem następuje natomiast weryfikacja, czy dana kombinacja nie została już wcześniej wpisana i uznana za poprawną (jeśli dana kombinacja wystąpi we wzorcu n razy, we wpisywanej treści maksymalnie n razy będzie uznana za poprawną). Jeżeli kombinacja wystąpiła mniej razy niż we wzorcu, jest uznawana za poprawną. W przeciwnym wypadku zostanie uznana za kombinację błędną.

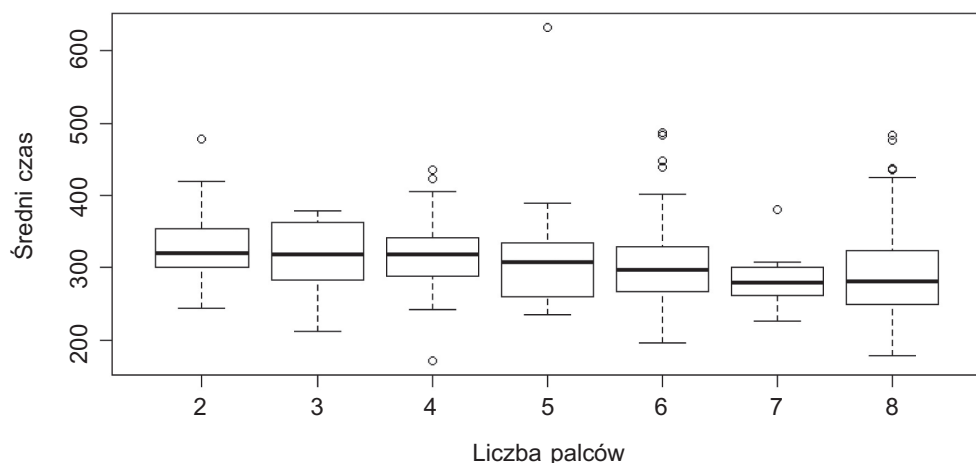
Innymi słowy, działanie algorytmu polega na sprawdzeniu, czy w wektorze wzorcowym (zawierającym zakodowaną do przepisywania treść dla danego bloku) wystąpiła określona kombinacja znaków znajdująca się w tablicy z wynikami eksperymentu. Jako kombinacja znaków rozumiana jest trójka złożona z trzech znaków: znaku wpisywanego oraz znaków występujących bezpośrednio przed nim i po nim. Dopiero gdy cała trójka jest poprawna, dany wiersz tablicy danych może zostać uznany za poprawny, i to tylko w wypadku, gdy dana kombinacja będzie przez użytkownika wpisana (do momentu wystąpienia rozważanej kombinacji) mniej razy, niż wystąpiła we wzorcu.

Zaproponowany algorytm jest heurystyczną metodą weryfikacji poprawności wpisywanej treści. Autor za poprawnie wpisane uznaje tylko te znaki, dla których znak poprzedni oraz znak następny również zostały wpisane poprawnie. Założenie to ma również na celu zweryfikowanie, czy czas wpisywania danego znaku zależy od znaku go poprzedzającego oraz znaku następującego po nim, a jeżeli tak, to w jakim stopniu.

Na podstawie zebranych w trakcie eksperymentu danych (które za pomocą przedstawionego algorytmu zostały zweryfikowane jako poprawne) przygotowano wykresy pudełkowe prezentujące zależności pomiędzy różnymi (pochodzącymi z ankiety osobowej) atrybutami a średnim czasem pisania. Do ich narysowania posłużyło oprogramowanie R-Studio.

W dalszej części opracowania stosowane będzie pojęcie **średniego czasu pisania**, które należy rozumieć jako **średni czas wpisywania pojedynczego znaku** podany w milisekundach. W związku z tym mniejsza wartość tego wskaźnika oznacza większą prędkość wpisywana, rozumianą jako liczba znaków wpisanych w jednostce czasu.

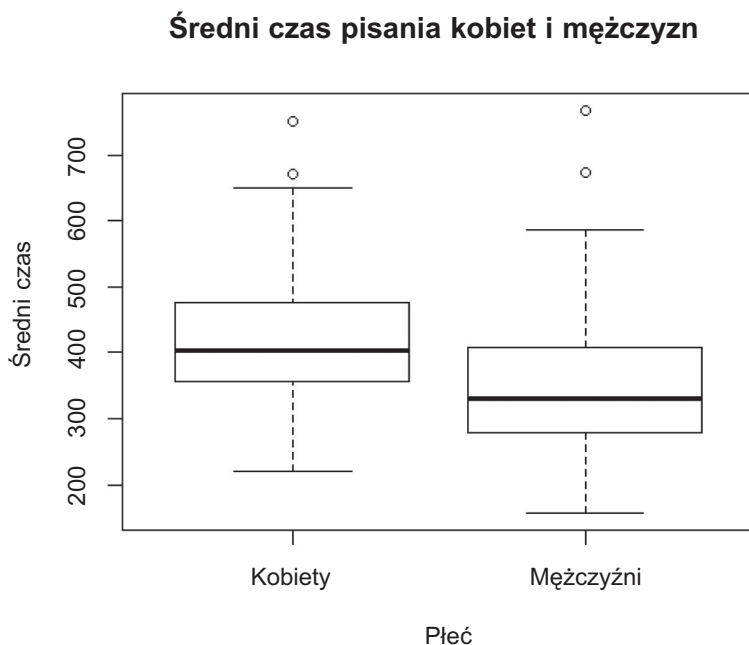
Pierwszy prezentowany wykres (rys. 127) zawiera zestawienie średniego czasu pisania z liczbą wykorzystywanych do pisania palców. Z wykresu można wnioskować, że wraz ze wzrostem ich liczby mediana średniego czasu pisania spada. Na tej podstawie można wysnuć twierdzenie, że wraz ze wzrostem liczby wykorzystywanych palców prędkość pisania rośnie. Ze względu na ograniczoną liczbę uczestników badania liczebność niektórych przedziałów jest zbyt niska, aby dokonać wiarygodnej analizy statystycznej, niemniej mediana dla liczby palców 7 i 8 jest na podobnym poziomie – niższym niż mediana pozostałych grup. Porównując czasy pisania uzyskane przez uczestników wykorzystujących 7 i 8 palców oraz pozostałych uczestników, można stwierdzić, że średnie czasy pisania w sposób istotny statystycznie różnią się od siebie. Uwzględniając te fakty, wyniki uzyskane wyłącznie przez osoby piszące 7 i 8 palcami wykorzystano w dalszych obliczeniach (i tylko te wyniki zostały zaprezentowane na wykresach w kolejnej części opracowania). Liczba uczestników, którzy spełnili wspomniane kryterium, wyniosła 139 (w tym 52 kobiety oraz 87 mężczyzn).



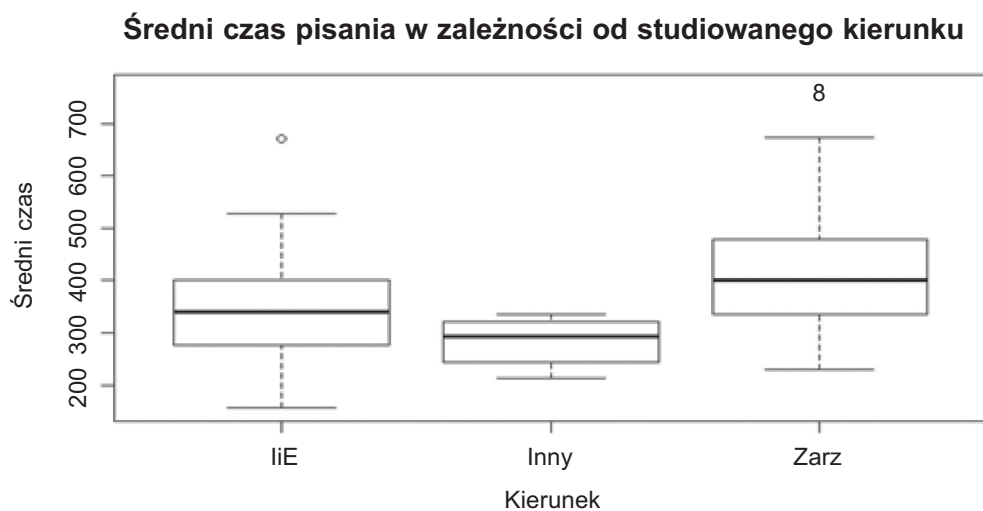
Rys. 127. Średni czas pisania w zależności od liczby wykorzystywanych do pisania palców

Na rysunku 128 zaprezentowany został średni czas pisania kobiet i mężczyzn. Na podstawie wykresu można wnioskować, że średnio mężczyźni pisali szybciej niż kobiety. Zdaniem autora na uwagę zasługuje kształt (rozpiętość poszczególnych obszarów) wykresów pudełkowych, które wydają się bardzo podobne dla obydwu grup.

Na rysunku 129 zaprezentowano zestawienie średnich czasów pisania uczestników studiujących na różnych kierunkach. Na podstawie wykresu można stwierdzić, że średni czas pisania studentów informatyki i ekonometrii jest krótszy niż studentów zarządzania. Grupa „Inny” liczy zbyt mało osób (4), by móc na jej temat wyciągać statystycznie istotne wnioski.



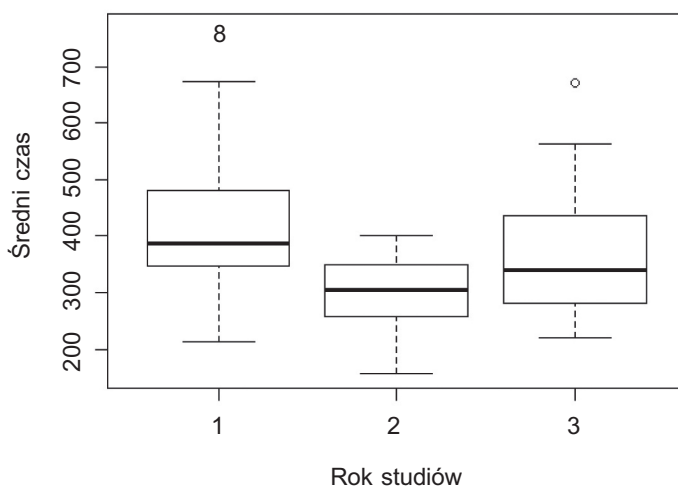
Rys. 128. Średni czas pisania kobiet i mężczyzn



Rys. 129. Średni czas pisania studentów różnych kierunków studiów

Na rysunku 130 przedstawiono średni czas pisania studentów danego roku studiów. Na podstawie niniejszego wykresu nie ma podstaw do wysunięcia hipotezy o wzroście tempa pisania wraz z ukończeniem kolejnych lat studiów.

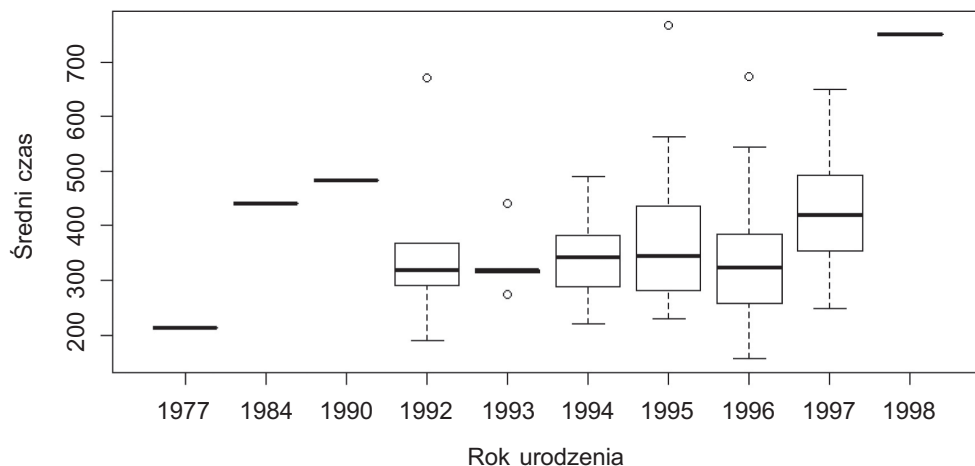
Średni czas pisania w zależności od roku studiów



Rys. 130. Średni czas pisania studentów różnych lat studiów

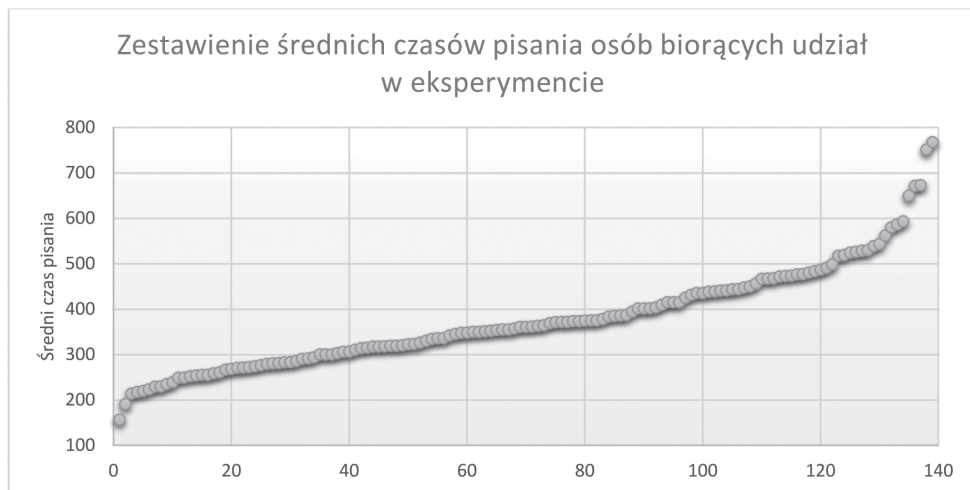
Ostatni z prezentowanych wykresów pudełkowych (rys. 131) zawiera informacje dotyczące średniego czasu pisania w zależności od roku urodzenia. Ze względu na małą licznosc użytkowników w danej grupie (tylko dwie grupy przekroczyły licznosc 30) niniejszy wykres można traktować tylko jako poglądowy, ponieważ wnioski wyciągane na jego podstawie byłyby obarczone bardzo dużą niepewnością i wysokim ryzykiem popełnienia błędu.

Średni czas pisania w zależności od roku urodzenia



Rys. 131. Średni czas pisania w zależności od roku urodzenia

Na wszystkich zaprezentowanych wykresach pudełkowych widoczne są obserwacje odstające [Wilcox 2010] (w postaci okręgów położonych poza tzw. wąsami wykresu). W celu lepszego ich zaprezentowania przygotowano wykres (rys. 132) zawierający zestawienie średniego czasu pisania dla każdego z użytkowników (czasy posortowane zostały rosnąco).



Rys. 132. Średni czas pisania każdego z uczestników eksperymentu

Na podstawie przedstawionych wykresów można wnioskować, że średnie czasy pisania pięciu osób wyraźnie odbiegają od pozostałych czasów, dlatego wyniki uzyskane przez te osoby będą potraktowane jako obserwacje odstające, w związku z czym zostaną usunięte z dalszych analiz. Z analiz zostały też usunięte obserwacje dotyczące osób, które pominęły wpisywanie tekstu któregośkolwiek z przygotowanych na potrzeby eksperymentu bloków. W dalszych badaniach poddano analizie wyniki uzyskane przez 127 osób.

Otrzymane wyniki pogrupowano ze względu na wpisywany znak, a także ze względu na znak bezpośrednio go poprzedzający oraz wpisywany bezpośrednio po nim. Dla każdej tak stworzonej grupy przeprowadzona została analiza zmierzająca do wykrycia obserwacji odstających. W tym celu użyto metody wykorzystywanej do wyznaczania wartości na wykresach pudełkowych [Wilcox 2010]. Za obserwacje odstające uznano te obserwacje, które:

- były większe niż wartość kwartyła trzeciego powiększona o półtorej wartości różnicy pomiędzy wartością kwartyła trzeciego i kwartyła pierwszego ($>Q_3 + 1,5 \cdot [Q_3 - Q_1]$);
- były mniejsze niż wartość kwartyła pierwszego pomniejszona o półtorej wartości różnicy pomiędzy wartością kwartyła trzeciego i kwartyła pierwszego ($<Q_1 - 1,5 \cdot [Q_3 - Q_1]$).

Ze zbioru danych usunięte zostały obserwacje, które zaklasyfikowano jako obserwacje odstające. Liczba obserwacji odstających wyniosła 10 712, co stanowiło 6,6% liczby wszystkich analizowanych obserwacji.

Do analizy pozostałych obserwacji (w liczbie 151 957) konieczne było wyznaczenie częstości występowania poszczególnych liter w języku polskim celem sprawdzenia wpływu częstości występowania danej litery na czas jej wpisywania. Kolejna część opracowania poświęcona została analizie częstości występowania poszczególnych liter w języku polskim.

3.3.2. Metoda wyznaczenia częstości występowania znaków w języku polskim

Do wyznaczenia częstości znaków w języku polskim autor wykorzystał następujące źródła:

1. **IPI PAN:** Korpus Instytutu Podstaw Informatyki Polskiej Akademii Nauk [Korpus IPI PAN 2006], czyli korpus języka polskiego zawierający około 25 milionów słów pochodzących m.in. z prasy, książek oraz aktów prawnych.
2. **SJP:** słownik języka polskiego [Słownik sjp.pl. 2014] zawierający wszelkie słowa dopuszczone w grach językowych; do jego stworzenia wykorzystano m.in. słowniki wyrazów obcych, słowniki języka polskiego oraz słownik ortograficzny języka polskiego.
3. **SF:** słownik frekwencyjny języka polskiego składający się z 10 tysięcy próbek, każda o liczności około 50 słów [Słownik frekwencyjny 2010].
4. **Napisy:** częstotliwość występowania 5000 najpopularniejszych słów w napisach do filmów [Wiktionary 2014]; na potrzeby analizy częstości występowania liter z listy słów usunięte zostały te, które nie znalazły się w słowniku języka polskiego.

Na podstawie wskazanych źródeł wyznaczono częstotliwość występowania każdej z liter. Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 6. Numeracja kolumn w tabeli jest analogiczna do kolejności opisu źródeł.

Tabela 6

Częstotliwość występowania litery w zależności od źródła analizowanych danych

Litera	1. IPI PAN [%]	2. SJP [%]	3. SF [%]	4. Napisy [%]
a	8,96	9,38	8,57	8,22
ą	0,99	1,29	1,04	0,76
b	1,48	1,92	1,47	2,08

Tabela 6 cd.

Litera	1. IPI PAN [%]	2. SJP [%]	3. SF [%]	4. Napisy [%]
c	3,98	4,10	4,08	3,94
ć	0,40	0,12	0,49	0,80
d	3,27	2,19	3,50	3,51
e	7,71	7,65	8,03	9,39
ę	1,11	0,65	1,27	2,13
f	0,30	0,44	0,23	0,11
g	1,43	1,32	1,37	1,27
h	1,08	1,15	1,04	0,88
i	8,26	8,94	8,49	8,75
j	2,29	1,95	2,25	3,23
k	3,53	3,16	3,24	2,66
l	2,11	2,39	2,06	1,68
ł	1,83	2,11	1,81	1,57
m	2,81	3,87	2,84	4,37
n	5,55	6,83	5,49	4,88
ń	0,20	0,28	0,17	0,12
o	7,65	7,97	7,48	7,53
ó	0,85	0,35	0,86	0,76
p	3,15	2,98	3,02	2,56
q	0,00	0,00	0,00	0,00
r	4,71	4,40	4,45	3,06
s	4,34	3,23	4,31	4,52
ś	0,67	0,97	0,76	1,14
t	3,87	2,74	4,04	4,83
u	2,37	2,71	2,29	1,72
v	0,04	0,00	0,01	0,00
w	4,67	4,52	4,57	3,01
x	0,02	0,00	0,00	0,00
y	3,78	4,98	3,87	3,49
z	5,68	4,67	5,89	5,61
ź	0,06	0,07	0,07	0,15
ż	0,83	0,65	0,93	1,25

Ze względu na występujące między wynikami z poszczególnych źródeł różnice w częstotliwości występowania liter autor zdecydował się na zastosowanie wag dla każdego ze źródeł. Do ustalenia wagi danego źródła wykorzystane zostaną dwa parametry:

1. Ocena liczności źródła (liczby słów).
2. Ocena reprezentatywności źródła.

W tabeli 7 przedstawiono kryteria oceny dla liczności źródła. Przez licznosc danych należy rozumieć liczbę słów składających się na dane źródło.

Tabela 7
Kryteria oceny liczności danych

Liczność danych	Ocena
>10 000 oraz $\leq 100\ 000$	1
>100 000 oraz $\leq 1\ 000\ 000$	2
>1 000 000 oraz $\leq 10\ 000\ 000$	3
>10 000 000 oraz $\leq 100\ 000\ 000$	4
>100 000 000	5

Na podstawie tabeli 7 dokonano oceny liczności każdego źródła. Tabela 8 zawiera oceny liczności źródeł danych, jak również ocenę reprezentatywności danych. Ocena reprezentatywności również została ujęta na skali od 1 (najniższy poziom reprezentatywności) do 5 (zbiór danych o największej reprezentatywności). Za źródło najbardziej reprezentatywne uznano słownik frekwencyjny, do którego stworzenia wykorzystano 10 tysięcy próbek tekstów. Jako drugie pod względem reprezentatywności źródło wybrano korpus IPI PAN, który powstał z wykorzystaniem tekstów z różnych publikacji i dziedzin. Ocenę 3 uzyskało źródło wykorzystujące napisy filmowe, ponieważ gromadzi ono tylko jeden rodzaj tekstów, a także lista słów zawężona została do 5 tysięcy najczęściej występujących wyrazów. Na ocenę miał wpływ również fakt, że w zestawieniu nie zostały uwzględnione słowa jednoliterowe. Najniżej oceniono reprezentatywność słownika języka polskiego, który nie zawiera informacji o częstości wystąpień danego słowa. Z tego względu wystąpienie danej litery w dowolnym słowie ma taką samą wagę, mimo że nie wszystkie słowa wykorzystywane są z taką samą częstotliwością.

Na podstawie oceny liczności oraz reprezentatywności została wyznaczona ocena danego źródła, która stanowi iloczyn obydwu wspomnianych ocen. Waga źródła oznacza udział oceny danego źródła w sumie ocen wszystkich analizowanych źródeł.

Wykorzystując wagę każdego ze źródeł, wyznaczono ważoną częstość występowania każdej z liter. Została ona obliczona jako suma iloczynów częstości litery w danym źródle oraz wagi tego źródła. W tabeli 9 zaprezentowano ważne wyniki częstości występowania poszczególnych liter.

Tabela 8

Wagi dla każdego ze źródeł danych

Źródło danych	Ocena liczności	Ocena reprezentatywności	Ocena źródła	Waga źródła
1. IPI PAN	5	4	20	0,344828
2. SJP	4	2	8	0,137931
3. SF	3	5	15	0,258621
4. Napisy	5	3	15	0,258621

Tabela 9

Ważona częstość występowania każdej z liter

Litera	Częstość występowania [%]
a	8,73
ą	0,99
b	1,69
c	4,01
ć	0,49
d	3,24
e	8,22
ę	1,35
f	0,25
g	1,36
h	1,03
i	8,54
j	2,48
k	3,18
l	2,02
ł	1,80
m	3,37
n	5,54
ń	0,18
o	7,62
ó	0,76
p	2,94

Tabela 9 cd.

Litera	Częstość występowania [%]
q	0,00
r	4,18
s	4,23
ś	0,85
t	4,00
u	2,23
v	0,02
w	4,20
x	0,01
y	3,89
z	5,58
ż	0,09
ź	0,94

Na podstawie częstości występowania liter podanej w tabeli 9 dokonano analizy wyników badania empirycznego, która to analiza jest kolejną częścią niniejszego rozdziału.

3.3.3. Analiza wyników

Zgromadzone i wybrane w opisany w poprzednich rozdziałach sposób dane zostały wykorzystane do weryfikacji występujących w literaturze twierdzeń dotyczących wpływu różnych czynników na tempo pisania. Pierwszym etapem analizy wyników było wyznaczenie średniego czasu pisania (w milisekundach) dla każdego z bloków tekstu. Średni czas pisania dla każdego z bloków przedstawiono w tabeli 10.

Tabela 10

Średni czas pisania danego bloku tekstu

Blok tekstu	Średni czas pisania [ms]
I	222,27
II	328,52
III	307,41
IV	427,62

Na podstawie tabeli 10 można wnioskować, że największa prędkość pisania (najmniejszy średni czas) została osiągnięta w przypadku bloku I, a najmniejsza – bloku IV. Zarówno blok pisania naprzemiennego (II), jak i blok ze zmianą rąk co drugi znak (III) były wpisywane zdecydowanie wolniej od bloku I. Wpływ na to mogła mieć trudność tekstu, który tylko w przypadku bloku I był gramatycznie poprawny. W tabeli 11 zamieszczono średnie oceny trudności wpisywanej treści wystawione przez uczestników badania. Skala ocen przyjmowała wartości od 1 (bardzo łatwy) do 4 (bardzo trudny). Blok I został uznany zdecydowanie za najłatwiejszy, natomiast blok IV był dla uczestników najtrudniejszy.

Tabela 11

Ocena trudności danego bloku tekstu

Blok tekstu	Ocena trudności
I	1,268
II	2,402
III	2,732
IV	3,283

Na uwagę zasługuje również średni czas wpisywania znaku, w sytuacji gdy jego poprzednikiem lub następnikiem jest spacja (tab. 12). Tempo wpisywania takiego znaku jest zdecydowanie największe dla bloku I. Wynikać to może z faktu, że w przypadku pozostałych bloków uczestnik badania potrzebował dłuższego czasu na zapoznanie się z kolejnymi słowami znajdującymi się w tekście wzorcowym. Taka teza koresponduje także z ocenami użytkowników dotyczącymi trudności treści danego bloku.

Tabela 12

Wpływ wystąpienia spacji na czas pisania

Blok tekstu	Spacja przed znakiem	Spacja po znaku
I	333,49	298,52
II	553,75	380,35
III	508,09	372,87
IV	648,60	405,79

Inną przyczyną przedstawionej w tabeli 12 dysproporcji pomiędzy średnim czasem dla każdego z bloków może być występowanie w blokach od II do IV większej liczby

znaków nieliterowych, w tym cyfr w bloku IV. W celu zwiększenia możliwości porównywania wyników różnych bloków autor zdecydował się na analizę wyników tylko dla małych liter (dla których znak poprzedzający i następujący to także litery). Wyniki analizy czasu pisania małych liter (w milisekundach) zawarte zostały w tabeli 13.

Tabela 13

Średni czas pisania małych liter danego bloku tekstu

Blok tekstu	Średni czas pisania [ms]
I	170,85
II	228,59
III	217,96
IV	168,13

Średnie czasy wpisywania małych liter uległy zdecydowanemu zmniejszeniu w odniesieniu do czasów wpisywania wszystkich znaków. Zmiana ta jest najbardziej widoczna dla bloku IV, w przypadku którego czas spadł o ponad 60%.

Zawężenie rozpatrywanego zbioru danych jedynie do czasów wpisywania małych liter miało także na celu zweryfikowanie, czy częstotliwość występowania danej litery wpływa na czas jej wpisywania, a jeśli tak, to w jakim stopniu. Autor zdecydował się na wybór jedynie małych liter, ponieważ tylko w ich przypadku możliwe było stworzenie wiarygodnych statystyk częstości ich występowania w języku polskim.

W celu weryfikacji siły zależności pomiędzy czasem wpisywania danej litery a częstością jej występowania w języku polskim przeprowadzone zostały testy korelacji (z wykorzystaniem programu Statistica). W tabeli 14 przedstawiono wyniki korelacji rang Spearmana z rozróżnieniem na bloki tekstu. Wszystkie współczynniki korelacji są istotne z $p < 0,05$.

Tabela 14

Korelacja rang Spearmana dla średniego czasu wpisywania litery oraz częstości występowania litery w języku polskim

Zmienna	Korelacja rang Spearmana	
	blok	częstość
Średni czas pisania	I	-0,787546
	II	-0,748534
	III	-0,795161
	IV	-0,800870

Wyznaczone współczynniki korelacji wskazują na bardzo wysoki poziom zależności średniego czasu wpisywania danej litery oraz częstości jej występowania w języku polskim. W tabeli 15 przedstawiono wyniki korelacji liniowej pomiędzy czasem wpisywania a logarytmem naturalnym z częstości występowania danej litery. Wprowadzenie logarytmu częstości miało na celu uwzględnienie nieliniowego charakteru zależności pomiędzy badanymi zmiennymi z wykorzystaniem modelu liniowego. Również w tym przypadku wszystkie współczynniki korelacji są istotne z $p < 0,05$.

Tabela 15

Korelacja liniowa pomiędzy średnim czasem wpisywania litery oraz logarytmem częstości występowania litery w języku polskim

Zmienna	Korelacja rang Spearmana	
	blok	częstość
Średni czas pisania	I	-0,787546
	II	-0,748534
	III	-0,795161
	IV	-0,800870

Z wyznaczonych wartości współczynników korelacji można wnioskować, że czas wpisywania litery jest bardzo silnie zależny od częstości występowania tej litery w języku polskim. Zaznaczyć należy, że nie zostały odrzucone (ze względu na niewielką liczbę stopni swobody) żadne obserwacje, które można byłoby uznać za skrajne i tym samym poprawić otrzymane rezultaty. Uzyskany wynik pozwala także wysnuć wniosek, że w przeprowadzonym badaniu częstość występowania danej litery jest istotniejsza niż położenie litery na klawiaturze (w przypadku korelacji między czasem pisania a wpisywaniem literę palcem czy rzędem, w którym litera jest umiejscowiona, współczynniki korelacji są nieistotne statystycznie). Dlatego też niemożliwe jest przeprowadzenie weryfikacji większości kryteriów optymalizacji występujących w literaturze ze względu na **kluczowy wpływ częstości występowania liter na czas ich wpisywania**. Jedynym kryterium, które jest warte sprawdzenia, jest kryterium naprzemienności pisania, ze względu na relatywnie równomierne obciążenie pisanem obydwu rąk (w związku z czym wpływ częstości występowania liter na czasy pisania dla poszczególnej ręki powinien być relatywnie proporcjonalny dla obydwu rąk). Kryterium naprzemienności jest także najczęściej pojawiającym się w literaturze przedmiotu i niejako determinuje pozostałe kryteria, tzn. dla pełnej naprzemienności pisania wszystkie kryteria dotyczące rozmieszczania znaków przy wpisywaniu dwóch kolejnych znaków tą samą ręką stają się nieistotne (ponieważ takie sytuacje już nie występują). Dlatego też autor podjął próbę weryfikacji tego kryterium.

W tabeli 16 przedstawiono średnie czasy pisania z uwzględnieniem tego, czy znak poprzedzający pisany jest tą samą czy drugą ręką.

Tabela 16

Średni czas pisania małych liter danego bloku tekstu z uwzględnieniem zmiany rąk przy wpisywaniu danej litery

Średni czas pisania [ms]	Blok tekstu	Zmiana rąk
158,36	I	tak
181,29	I	nie
228,59	II	tak
212,63	III	tak
222,97	III	nie
160,68	IV	tak
178,94	IV	nie

Dla każdego z bloków przeprowadzono testy na istotność statystyczną różnicy średnich. Ze względu na brak spełnienia warunku o normalności rozkładu wybrano test nieparametryczny (test Kołmogorowa–Smirnowa). W jednym ze źródeł [Statistica 2011] przedstawiono pogląd, że dla dużych próbek danych (>100) należy wykorzystywać testy parametryczne pomimo niespełnienia warunku o normalności rozkładu w próbie danych. Dlatego też wykonano dodatkowy test parametryczny (test t). Wyniki testów przeprowadzonych w programie Statistica przedstawiono odpowiednio w tabelach 17 oraz 18.

Tabela 17

Wyniki testu Kołmogorowa–Smirnowa na równość średnich w poszczególnych blokach

Zmienna	Test Kołmogorowa–Smirnowa						
	maks. uj.	maks. dod.	p	średnia	średnia	odch. std.	odch. std.
Średni czas pisania (blok I)	–0,01892	0,23105	$p < .001$	181,2946	158,3649	87,34371	81,05663
Średni czas pisania (blok III)	–0,01797	0,12725	$p < .001$	222,9744	212,6326	131,5990	129,1212
Średni czas pisania (blok IV)	–0,04043	0,17478	$p < .001$	178,9438	160,6810	95,02827	80,85200

Tabela 18Wyniki testu t na równość średnich w poszczególnych blokach

Zmienna	Test t								
	średnia	średnia	t	df	p	odch. std.	odch. std.	iloraz f	p
Średni czas pisania (blok I)	181,295	158,3649	20,8915	23920	0,00	87,343	81,057	1,1611	0,0000
Średni czas pisania (blok III)	222,974	212,6326	5,22856	17401	0,00	131,60	129,12	1,0387	0,0764
Średni czas pisania (blok IV)	178,944	160,6810	9,47038	8408	0,00	95,028	80,852	1,3814	0,0000

W przypadku każdego bloku, w którym wystąpiły kombinacje znaków pisanych zarówno naprzemiennie, jak i pisanych jedną ręką (bloki I, III i IV), czas pisania kombinacji wpisywanych naprzemiennie był statystycznie różny od czasu pisania kombinacji wpisywanych tą samą ręką. Na tej podstawie, uwzględniając dane o średniej szybkości pisania w danym bloku (tab. 16), można wysnuć wniosek, że analizowane wyniki dają podstawę do stwierdzenia, że szybsze było wpisywanie znaków naprzemiennie w stosunku do wpisywania znaków tą samą ręką.

Na podstawie zebranych danych przeanalizowany został także wpływ różnych czynników na liczbę popełnianych błędów. Z przeprowadzonej analizy wynika, że czynnikiem, który istotnie wpływał na liczbę popełnianych błędów, było wykorzystywanie klawisza AltGr, służącego do wpisywania znaków diakrytycznych.

W tabeli 19 przedstawiono współczynnik poprawności wpisywania liter diakrytycznych oraz pozostałych liter. Jego wartość została obliczona jako iloraz liczby poprawnie wpisanych znaków i liczby znaków zawartych we wzorcu treści.

Tabela 19

Wartość współczynnika poprawności dla liter diakrytycznych oraz pozostałych liter

Blok tekstu	Litera diakrytyczna	Współczynnik poprawności [%]
I	nie	84,6
I	tak	76,1
II	nie	82,2
II	tak	78,2
III	nie	82,2
III	tak	75,4
IV	nie	85,5
IV	tak	74,2

Zamieszczone w tabeli 19 dane potwierdzają, że współczynnik poprawności jest zdecydowanie wyższy dla liter, które nie wymagają wykorzystywania klawisza AltGr. Litery diakrytyczne są wyraźnie częściej wpisywane błędnie niż pozostałe litery (średnia współczynnika poprawności to 76% dla liter diakrytycznych oraz 83,6% dla pozostałych liter). Spostrzeżenie to zostało wykorzystane przy projektowaniu modelu optymalizacji rozmieszczenia znaków.

3.4. Podsumowanie

Niniejszy rozdział poświęcono opisowi przeprowadzonego przez autora eksperymentu. Zawiera on ilustracje prezentujące informacje, jakie przedstawiono uczestnikom eksperymentu, a także charakterystykę osób, które wzięły udział w badaniu. Z zebranych danych odrzucono te, które zgodnie z zaproponowanym w monografii algorytmem nie zostały uznane za poprawne. Dane poddano także weryfikacji statystycznej.

Na podstawie porównania średniego czasu pisania w poszczególnych blokach (tab. 10 i 13) nie można potwierdzić hipotezy o tym, że naprzemiennie pisanie jest szybsze niż bez naprzemienności. Może to jednak wynikać z faktu, że bloki ze spreparowaną treścią (bloki II i III) były ocenione przez uczestników (tab. 11) jako trudniejsze niż blok zawierający poprawnie gramatyczną treść (blok I). Analizując dane poszczególnych bloków jako oddzielne grupy danych, można wysnuć wniosek, że w ramach danego bloku znaki, które są pisane drugą ręką niż znak je poprzedzający, są wpisywane szybciej niż znaki wpisywane tą samą ręką. Na podstawie przeprowadzonej i zaprezentowanej analizy, zdaniem autora, kryterium optymalizacyjne polegające na maksymalizacji naprzemienności pisania zostało potwierdzone.

Rezultaty otrzymane w niniejszym rozdziale wskazują na bardzo silną zależność pomiędzy częstotliwością występowania litery a średnim czasem jej pisania. Wynik taki uniemożliwił weryfikację innych kryteriów niż naprzemiennność, ponieważ częstość występowania litery miała kluczowy wpływ na czas jej wpisywania. Na tej podstawie można wysnuć wniosek, że wraz ze wzrostem wykorzystania danego klawisza spada czas niezbędny do jego wciśnięcia.

Ostatnim istotnym wnioskiem jest spostrzeżenie, że wykorzystanie klawisza AltGr zmniejsza wartość współczynnika poprawności, czyli przyczynia się do popełniania błędów podczas pisania.

Przeprowadzone badania pozwoliły na sformułowanie trzech ważnych wniosków, które zostaną wykorzystane w dalszej części opracowania, a mianowicie:

1. Układ klawiatury powinien maksymalizować naprzemiennność pisania [Feit i in. 2016; Dhakal i in. 2018].
2. Czas wpisywania danej litery (obsługi danego klawisza) jest bardzo silnie zależny od częstości jej wykorzystania.
3. Użycie klawisza AltGr zwiększa prawdopodobieństwo błędnego wpisania danej litery.

Kolejny rozdział został poświęcony opracowaniu modelu rozmieszczenia znaków na klawiaturze oraz wykonaniu projektu układu dostosowanego do potrzeb języka polskiego.

4. Optymalizacja rozmieszczenia klawiszy

Tematyka optymalizacji rozmieszczenia znaków na klawiaturze komputera jest szeroko dyskutowana w literaturze. Problem rozmieszczenia znaków na klawiaturze (*keyboard arrangement problem*) jest problemem NP-zupełnym [Yin, Su 2011]. Może on przyjmować różne formy w zależności od języka, do którego dostosowywany jest układ. W przypadku języka angielskiego liczba liter alfabetu wynosi 26. Oznacza to, że klawiszy na klawiaturze jest więcej niż liter, które do klawiszy należy przypisać. W przypadku języka polskiego problem jest bardziej skomplikowany, ponieważ polski alfabet liczy 32 litery. Przy budowie układu klawiatury dla języka polskiego należy uwzględnić również litery „X”, „V” oraz „Q”, które w polskim alfabecie nie występują, jednak są obecne w słowach stanowiących zapożyczenia z języków obcych. W związku z tym liczba liter, które należy rozmieścić w układzie przystosowanym do języka polskiego, wynosi 35. Oznacza to, że jeżeli przy rozmieszczaniu liter nie jest brany pod uwagę także wiersz numeryczny, nie wszystkie litery mogą być przypisane do warstwy I klawiatury.

Problem rozmieszczenia znaków na klawiaturze jest problemem złożonym również ze względu na cele, jakie dany układ ma spełniać. W związku z występowaniem wielu celów optymalizacji do rozwiązania problemu wykorzystywana jest optymalizacja wielokryterialna.

Ze względu na swą złożoność problem rozmieszczenia znaków stał się tematem licznych artykułów, których autorzy stosują do jego rozwiązania wiele różnych metod. W pracy Leshera i innych [1998] zaproponowano heurystykę n -optymalną, która wzorowana jest na heurystyce o tej samej nazwie, wykorzystywanej do rozwiązywania problemu komiwojażera. Sörensen [2007] zaproponował algorytm o nazwie *multi-start descent algorithm*, którego działanie polega użyciu metody multistartu (wielostartu) z różnych losowych punktów, a następnie poprawianiu rozwiązania za pomocą zaadaptowanej metody przeszukiwania lokalnego (*local search*). Light i Anderson [1993] do poszukiwania najlepszego rozwiązania zastosowali heurystykę symulowanego wyżarzania (*simulated annealing*). Zubrzycka [1963] z kolei w swojej pracy wykorzystwała połączenie metody hierarchicznej, polegającej na optymalizacji jednokryterialnej względem kolejnych kryteriów, oraz metody kryteriów ważonych.

Do rozwiązania problemu rozmieszczenia znaków na klawiaturze zastosowane zostały także m.in. algorytmy genetyczne [Deshwal, Deb 2003; Goettl i in. 2005; Onsorodi, Korhan 2020; Nivasch, Azaria 2021], algorytm mrówkowy [Eggers i in. 2003; Wagner i in. 2003], połączenia różnych algorytmów [Pradeepmon i in. 2018] czy metaheurystyka roju [Yin, Su 2011].

4.1. Model optymalizacji rozmieszczenia znaków

Zaprezentowany w niniejszej części opracowania model jest efektem analizy wyników badania empirycznego, a także przeglądu literatury. Autor zdecydował się na zastosowanie modelu wielokryterialnej optymalizacji hierarchicznej ze względu na:

- niemożliwość znalezienia rozwiązania optymalnego dla metody wielokryterialnej z ważonymi kryteriami z powodu złożoności obliczeniowej rzędu $O(n!)$, gdzie n oznacza liczbę rozmieszczanych znaków ($n = 32$ przy uwzględnieniu wyłącznie liter polskiego alfabetu);
- brak przesłanek (na podstawie badania empirycznego oraz literaturowego) do wiarygodnego wyznaczenia wag danego kryterium, co ogranicza możliwości zastosowania optymalizacji wielokryterialnej z ważonymi kryteriami;
- możliwość wyznaczenia optymalnego układu dla przyjętej listy kryteriów;
- krótki (kilkuminutowy) czas wyznaczania układu optymalnego.

Zaproponowany model optymalizacji dotyczy wyłącznie rozmieszczenia liter, ponieważ przeprowadzone badania (rozdział 3) nie dają podstaw m.in. do zmiany rozmieszczenia cyfr w rzędzie numerycznym.

Do modelu optymalizacji rozmieszczenia znaków wprowadzono ograniczenie dotyczące liczby klawiszy, dla których przeprowadzona zostanie optymalizacja. Liczbę klawiszy, do których przypisywane będą litery, ograniczono do 30 z następujących względów:

- dwa klawisze zostały przeznaczone na znaki „.” oraz „,”, których częstość występowania jest większa niż częstość występowania pięciu najrzadziej używanych liter w języku polskim (w tym „X”, „Q” oraz „V”);
- ze względu na występowanie różnych klawiatur zgodnych z normą ISO/IEC 9995-2 (rys. 2) wzięto pod uwagę tylko część wspólną klawiatur;
- litery nie będą umieszczane w rzędzie numerycznym, ponieważ na podstawie przeprowadzonych badań można przypuszczać, że wpisywanie znaków z rzędu numerycznego jest trudniejsze (tab. 11) i wolniejsze (tab. 13) oraz wymaga wykonania dłuższego ruchu w porównaniu ze znakami znajdującymi się w rzędzie dolnym, środkowym i górnym.

Zaproponowana optymalizacja układu będzie dotyczyć 30 klawiszy literowych wspólnych dla klawiatur zgodnych z normą ISO/IEC 9995-2 (położenie klawiszy ze znakami „. ” oraz „, ” nie będzie podlegać optymalizacji, ale znaki te również zostaną przypisane do klawiszy części wspólnej klawiatur). Wspomniany fragment klawiatury jest identyczny (pod względem rozmieszczenia klawiszy) dla wszystkich klawiatur zgodnych z ww. normą i dlatego też tego fragmentu dotyczyć będzie optymalizacja. Do klawiszy położonych poza optymalizowanym fragmentem klawiatury zostaną również przypisane litery, przy czym będą one zdublowane z literami przypisanymi do warstwy III (wymagającej użycia klawisza AltGr) fragmentu wspólnego klawiatur. Celem takiego działania jest zapewnienie możliwości wpisywania wszystkich liter z wykorzystaniem tych samych klawiszy lub kombinacji klawiszy bez względu na użytkowany typ klawiatury, jak również przypisanie do warstwy I możliwie największej liczby liter.

Opracowując model optymalizacji rozmieszczenia liter, przyjęto następujące kryteria:

- I. Minimalizacja wykorzystania klawisza AltGr.
- II. Maksymalizacja naprzemienności.
- III. Minimalizacja ruchu palców (związanych z przemieszczaniem palców z pozycji domyślnej).
- IV. Minimalizacja prawdopodobieństwa wpisywania dwóch liter znajdujących się w skrajnych rzędach przez tę samą rękę.
- V. Minimalizacja prawdopodobieństwa wpisywania liter tym samym palcem jednej ręki.
- VI. Maksymalizacja częstości pisania bigramów (wpisywanych jedną ręką) w kierunku od małego palca do palca wskazującego.

Wszystkie zaprezentowane w modelu optymalizacji rozmieszczenia liter kryteria zostały opisane w kolejnej części niniejszego opracowania.

Kryterium optymalizacji I wynika z przeprowadzonych w rozdziale 3 analiz dotyczących czynników wpływających na prawdopodobieństwo popełnienia błędu. Jednym z nich jest wykorzystanie klawisza AltGr, dlatego powinien on być jak najrzadziej używany. W związku z tym litery, których wpisanie wymaga wykorzystania klawisza AltGr, powinny występować statystycznie rzadziej od liter, których wpisanie nie wymaga jego użycia.

Kryterium minimalizacji wykorzystania klawisza AltGr znalazło się w modelu optymalizacji na pierwszym miejscu z następujących powodów:

- jest to jedyne kryterium, które dotyczy minimalizacji liczby popełnianych błędów;
- kryterium to minimalizuje także ruch palców (związany z wykorzystaniem klawisza AltGr);

- autor chce zwrócić uwagę na problem konieczności wykorzystywania klawisza AltGr do wpisywania wszystkich liter diakrytycznych (m.in. w układach QWERTY i Dvoraka), czyli statystycznie co 14 wpisywanej litery, podczas gdy łączna częstość występowania liter „X”, „V” oraz „Q” (które znajdują się w warstwie I klawiatury) wynosi zaledwie 0,045%.

Drugim kryterium najczęściej występującym w literaturze jest kryterium maksymalizacji szybkości wpisywania znaków. Przeprowadzone badania (podrozdział 3.3) potwierdziły zasadność tego kryterium. Tempo pisania jest jednym z podstawowych wyznaczników oceny efektywności danego układu, w związku z tym kryterium maksymalizujące szybkość pisania powinno zostać uznane za jedno z kluczowych dla modeli optymalizujących rozmieszczenie liter na klawiaturze. Warto zauważyć, że maksymalizacja kryterium II wpływa na poprawę wyników uzyskanych dla kryteriów IV i V przez zminimalizowanie częstości bigramów pisanych tą samą ręką.

Kolejnym kryterium jest minimalizacja ruchów palców. Ma ono na celu zmniejszenie zmęczenia związanego z koniecznością wykonywania ruchów palców podczas pisania. Przypisanie najczęściej występujących liter do pozycji domyślnych dla pisania bezwzrokowego sprawia, że wpisywanie tych liter nie wymaga dodatkowych ruchów palców (poza wciśnięciem klawisza), co pozytywnie wpływa na ergonomię pisania. Kryterium to wpływa także na wyniki otrzymane dla kryterium IV, ponieważ maksymalizacja częstości występowania liter w pozycjach domyślnych znajdujących się w rzędzie środkowym powoduje, że litery o mniejszej częstotliwości występowania umieszczane są w rzędach skrajnych.

Kryterium IV ma na celu zwiększenie ergonomii pisania przez zmniejszenie liczby ruchów, które (na podstawie badań literaturowych) uznane zostały za niekomfortowe. W rozważanym przypadku ruchy te dotyczą wpisywania bigramów, których litery położone są w skrajnych rzędach oraz wpisywane są przez tę samą rękę. Dodatkowym efektem minimalizacji wspomnianych niekomfortowych ruchów jest zwiększenie częstości bigramów, których litery umiejscowiono w tym samym (górnym albo dolnym) rzędzie. Warunek ten również występuje w literaturze jako jedno z kryteriów optymalizacji [np. Dvorak, Dealey 1936].

Kryterium V dotyczy minimalizacji częstości bigramów wpisywanych tym samym palcem. Celem tego kryterium jest skrócenie czasu wpisywania liter. Większość źródeł literaturowych [m.in. Dvorak, Dealey 1936] jest zgodna co do tego, że wpisywanie bigramu dwoma różnymi palcami jest szybsze niż wpisywanie dwóch liter tym samym palcem.

Ostatnim zaproponowanym w modelu optymalizacji rozmieszczenia liter kryterium jest maksymalizacja pisania w kierunku od małego palca do palca wskazującego.

Kryterium to ma za zadanie zwiększenie ergonomii pisania, ale także zapewnienie jednoznaczności przyporządkowania litery do konkretnego klawisza (na podstawie grup liter przypisanych do grup klawiszy).

Na podstawie zaprezentowanego opisu modelu optymalizacji rozmieszczenia liter na klawiaturze można zauważyć, że kryteria optymalizacji częściowo się pokrywają i wzajemnie się uzupełniają. Kryteria, które wpływają na osiąganie lepszych rezultatów przez inne kryteria, zostały uznane za ważniejsze i w hierarchii optymalizacji znajdują się wyżej. Opisanie kryteria składają się na model optymalizacji, którego celem jest minimalizacja liczby popełnianych błędów, maksymalizacja szybkości pisania, minimalizacja ruchu palców oraz zwiększenie ergonomii projektowanego układu. Przedstawiony model optymalizacji jest modelem uniwersalnym i można go wykorzystać do optymalizacji układu dla dowolnego języka, dla którego możliwe jest wyznaczenie statystyk częstości występowania liter oraz bigramów. Na potrzeby niniejszego opracowania optymalizacja układu przeprowadzona zostanie z uwzględnieniem języka polskiego.

4.2. Implementacja modelu optymalizacji

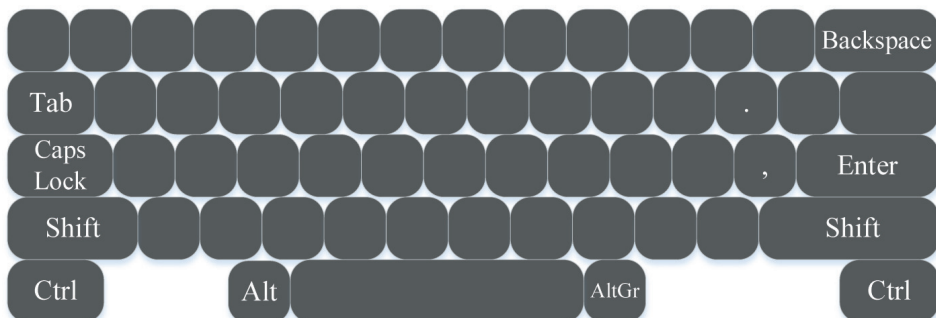
Zaprezentowany model optymalizacji został zaimplementowany w środowisku Visual Basic for Applications. Do przeprowadzenia optymalizacji wykorzystano metodę pełnego przeglądu (przeglądu zupełnego).

Na potrzeby niniejszej części pracy konieczne było wyznaczenie częstości bigramów w języku polskim. Procedura wyznaczenia częstości bigramów była analogiczna do określenia częstości występowania liter w języku polskim (podrozdział 3.3), tzn. dla każdego ze źródeł (IPI PAN, SJP, SF, Napisy) została wyznaczona waga źródła, a ostateczna częstość bigramów była średnią ważoną częstości wszystkich źródeł. Tabela zawierająca częstości wszystkich bigramów znajduje się w *Załączniku nr 1*.

Modele decyzyjne dla poszczególnych kryteriów zostały załączone tylko dla tych kryteriów, w przypadku których obliczenia były nieoczywiste. W przypadku np. kryterium I, dotyczącego minimalizacji wykorzystania klawisza AltGr, jedynymi obliczeniami, jakie należało wykonać, było posortowanie liter na podstawie ich częstości, a następnie wybranie najczęstszych 30. W związku z tym dla kryteriów I oraz III modele decyzyjne nie zostały wyznaczone.

Znaki nieliterowe („. ” oraz „, , ”) przypisano do skrajnych klawiszy obsługiwanych przez mały palec prawej ręki. Działanie to miało na celu pozostawienie wolnej środkowej części klawiatury (liczącej 30 klawiszy) na potrzeby optymalizacji rozmieszczenia liter. Drugim argumentem przemawiającym za umieszczeniem wspomnianych znaków w skrajnej prawej części fragmentu wspólnego dla klawiatur zgodnych z normą

ISO/IEC 9995-2 jest fakt, że w zdecydowanej większości przypadków po wpisaniu znaków „.” lub „,” następuje znak spacji, który może być również wciśnięty przez lewą rękę, co daje czas na powrót palców do pozycji domyślnej. Na rysunku 133 przedstawiono położenie na klawiaturze wymienionych znaków.



Rys. 133. Położenie znaków „.” oraz „,” w optymalizowanym układzie

Na podstawie kryterium I dokonano podziału liter na dwie grupy:

1. Niewymagające wykorzystania klawisza AltGr: a, ą, b, c, ć, d, e, ę, f, g, h, i, j, k, l, ł, m, n, o, ó, p, r, s, ś, t, u, w, y, z, ż.
2. Wymagające wykorzystania klawisza AltGr: ń, q, v, x, ź.

Sumaryczna częstość liter, których użycie wymaga klawisza AltGr, wynosi (na podstawie przedstawionych w rozdziale 3.3 statystyk) 0,3%. Autor uwzględnił w zaprezentowanym podziale liter także fakt, że litery „X”, „V” oraz „Q” nie występują w polskim alfabecie.

Kryterium II ma na celu zmaksymalizowanie częstości bigramów, które są pisane obydwoma rękami. Poniżej przedstawiony został model decyzyjny podziału liter pomiędzy ręce.

Model 3. Maksymalizacja naprzemienności pisania

Oznaczenia zmiennych:

B – zbiór bigramów;

L – zbiór 35 liter;

Lk1 – zbiór 30 liter (wyznaczonych na podstawie kryterium I), $Lk1 \subset L$;

b – pojedynczy bigram: $b = \{l_{b1}, l_{b2}\}$, gdzie l_{b1}, l_{b2} oznaczają odpowiednio pierwszą i drugą literę bigramu **b**, $b \in B$;

l – pojedyncza litera, $l \in L$;

cz_b – częstość występowania bigramu **b**.

Zmienne decyzyjne:

$$x_l = \begin{cases} 1 - \text{jeżeli litera } l \text{ przypisana jest do ręki lewej} \\ 0 - \text{jeżeli litera } l \text{ przypisana jest do ręki prawej} \end{cases}$$

gdzie x_l – zmienna binarna odpowiadająca za przypisanie litery do danej ręki;

$$y_b = \begin{cases} 1 - \text{jeżeli } x_{l_{b1}} = x_{l_{b2}} \\ 0 - \text{jeżeli } x_{l_{b1}} \neq x_{l_{b2}} \end{cases}$$

gdzie y_b – zmienna binarna opisująca, czy dany bigram (b) jest pisany obydwoma rękami.

Funkcja celu:

$$\sum_{b \in B} y_b \cdot cz_b \rightarrow \min$$

Ograniczenia:

$$\sum_{l \in Lk1} x_l = 15$$

$$x_l \in \{0, 1\}$$

$$y_b \in \{0, 1\}$$

Zaprezentowany model służy do minimalizacji częstości bigramów wpisywanych tą samą ręką, czyli maksymalizuje naprzemiennność pisania. Możliwych podziałów liter na dwie grupy (które należy zweryfikować w celu znalezienia rozwiązania optymalnego) jest 2^{35} , jednak nie wszystkie tak powstałe grupy będą spełniać zadane ograniczenie.

W optymalizacji uwzględniono wszystkie litery, jednak ograniczenie dotyczy jedynie liter przypisanych do warstwy I. Celem ograniczenia jest przypisanie do każdej z rąk dokładnie 15 liter (która to wartość odpowiada liczbie obsługiwanych przez daną rękę klawiszy części wspólnej klawiatury, do których litery te zostaną przypisane).

Litery podzielono na dwie równoliczne (dla warstwy I) grupy (za pomocą metody pełnego przeglądu) z wykorzystaniem wyznaczonych częstości bigramów. Otrzymany podział pozwolił na uzyskanie współczynnika naprzemienności pisania równego 72,98%, co oznacza, że blisko 3/4 wpisywanych bigramów będzie pisanych naprzemiennie.

Wykonana analiza ostatniej litery wyrazów w języku polskim wykazała, że zdecydowanie częściej kończą się one na samogłoską. W związku z tym grupa liter zawierająca samogłoski powinna zostać przypisana do lewej ręki, ponieważ do prawej przypisane

będą znaki „. ” oraz „, ”, które częściej będą następnikami samogłosek niż spółgłosek. Podział liter na grupy (wraz z przyporządkowaniem do obsługującej je ręki) przedstawiono w tabeli 20. Zaznaczone (pogrubione) zostały litery, których wpisanie wymaga wykorzystania klawisza AltGr.

Tabela 20

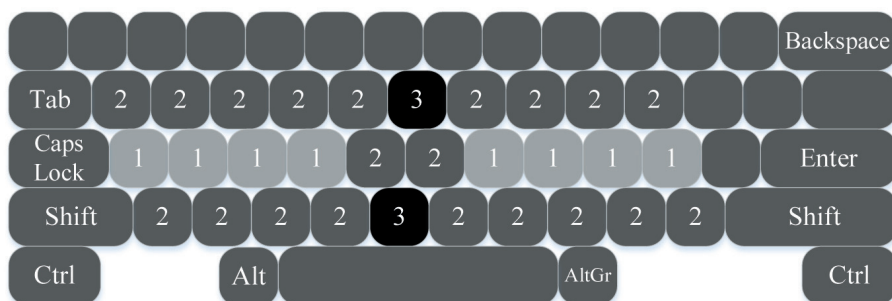
Podział liter maksymalizujący naprzemiennność pisania

Litera	Obsługująca ręką	Litera	Obsługująca ręką
a	lewa	ń	prawa
ą	lewa	o	lewa
b	prawa	ó	lewa
c	prawa	p	prawa
ć	lewa	q	prawa
d	prawa	r	lewa
e	lewa	s	lewa
ę	lewa	ś	lewa
f	lewa	t	prawa
g	prawa	u	lewa
h	lewa	v	prawa
i	lewa	w	prawa
j	prawa	x	prawa
k	prawa	y	lewa
l	prawa	z	prawa
ł	prawa	ż	lewa
m	prawa	ź	prawa
n	prawa		

Kryterium III dotyczy minimalizacji ruchów palców. Na potrzeby tego kryterium klawiatura została podzielona na trzy grupy:

1. pozycje wyjściowe w pisaniu bezwzrokowym – klawisze, których wykorzystanie nie wymaga przesuwania palców;
2. pozycje sąsiadujące z pozycjami wyjściowymi;
3. pozycje niesąsiadujące z pozycjami wyjściowymi.

Na rysunku 134 przedstawiono podział klawiatury na wymienione grupy pozycji.



Rys. 134. Podział na grupy względem kryterium III

Do grupy 1 przypisane zostały litery o największej częstotliwości (z uwzględnieniem podziału na ręce, na podstawie kryterium II) ze względu na brak konieczności przesuwania palców w celu ich użycia. Do tej grupy zaklasyfikowano następujące litery:

- dla lewej ręki: a, i, e, o;
- dla prawej ręki: z, n, w, c.

Sumaryczna częstość występowania liter, których wpisanie nie wymaga ruchów palców (względem pozycji wyjściowej), wynosi 52,4%. Oznacza to, że statystycznie ponad połowa wpisywanych liter nie będzie wymagała przesuwania palców z pozycji wyjściowej.

Grupa 2 składa się z następujących liter:

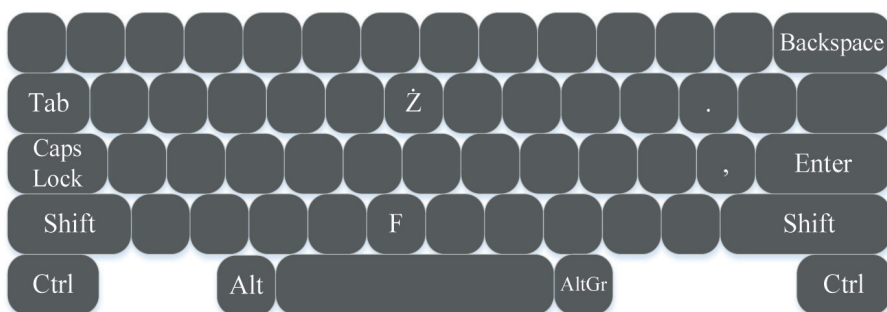
- dla lewej ręki: q, ć, ę, h, ó, r, s, ś, u, y;
- dla prawej ręki: b, d, g, j, k, l, ł, m, p, t.

Do grupy 3 zaklasyfikowane zostały dwie najrzadziej występujące (dla danej ręki) litery, ponieważ przypisane im klawisze wymagają najdłuższego ruchu (licząc od pozycji wyjściowej) ze wszystkich rozpatrywanych 30 klawiszy. W skład tej grupy weszły następujące litery:

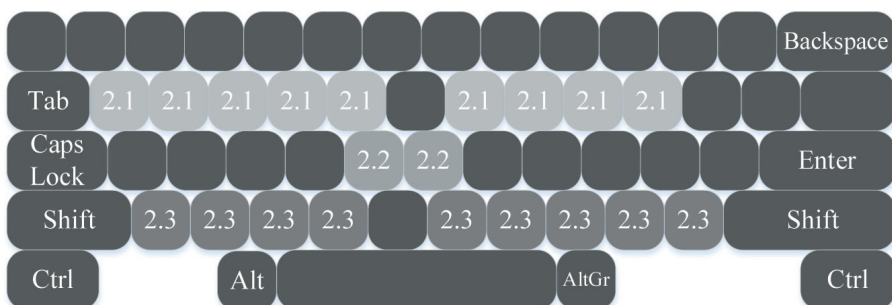
- litera f dla ręki;
- litera ż dla prawej ręki.

Na podstawie kryterium III możliwe jest jednoznaczne przypisanie liter grupy 3 do konkretnych klawiszy. Na rysunku 135 przedstawione zostało umiejscowienie liter „F” oraz „Ż”.

Obliczenia na potrzeby kryterium IV, dotyczącego minimalizacji częstości bigramów znajdujących się w skrajnych rzędach i wpisywanych przez tę samą rękę, polegać będą na podziale obydwu drugich grup (powstałych na podstawie kryterium III z uwzględnieniem podziału na ręce) na kolejne podgrupy, których schemat rozmieszczenia na klawiaturze przedstawiony został na rysunku 136.



Rys. 135. Znaki przypisane do konkretnych klawiszy na podstawie kryteriów I–III



Rys. 136. Podział na podgrupy grupy 2 (z kryterium III)

Ponieważ optymalizacja rozmieszczenia liter dla kryterium IV dla każdej z rąk będzie wyglądać analogicznie, przedstawiony został tylko model dla prawej ręki. Jedyną istotną różnicą (pomiędzy modelami dla obydwu rąk) jest ograniczenie liczby liter w rzędzie górnym i dolnym, które dla prawej ręki wynosi odpowiednio 5 oraz 4, podczas gdy dla lewej ręki są to wartości 4 oraz 5.

Model 4. Minimalizacja częstości liter położonych w skrajnych rzędach wpisywanych tą samą ręką

Oznaczenia zmiennych:

B – zbiór bigramów;

L – zbiór 35 liter;

$Lk3l$ – zbiór 10 liter (wyznaczonych na podstawie kryterium III dla ręki lewej jako grupa 2), gdzie $Lk3l \subset L$;

b – pojedynczy bigram: $b = \{l_{b1}, l_{b2}\}$, gdzie l_{b1}, l_{b2} oznaczają odpowiednio pierwszą i drugą literę bigramu b , $b \in B$;

l – pojedyncza litera, $l \in L$;

cz_b – częstość występowania bigramu b .

Zmienne decyzyjne:

$$wl_l = \begin{cases} 1 - \text{jeżeli litera } l \text{ przypisana jest do podgrupy 2.1} \\ 2 - \text{jeżeli litera } l \text{ przypisana jest do podgrupy 2.2} \\ 3 - \text{jeżeli litera } l \text{ przypisana jest do podgrupy 2.3} \end{cases}$$

gdzie wl_l – zmienna odpowiadająca przypisaniu l -tej litery do jednej z trzech grup ($g1, g2$ lub $g3$);

$$z_b = \begin{cases} 1 - \text{jeżeli } wl_{l_{b1}} \neq 2 \text{ oraz } wl_{l_{b1}} \neq 2 \text{ oraz } wl_{l_{b1}} \neq wl_{l_{b2}} \\ 0 - \text{inaczej} \end{cases}$$

gdzie z_b – zmienna binarna opisująca, czy dany bigram (b) składa się z liter (l) położonych w skrajnych rzędach.

Funkcja celu:

$$\sum_{b \in B} z_b \cdot cz_b \rightarrow \min$$

Ograniczenia:

$$\sum_{l \in Lk3l} g1_l = 5$$

$$\sum_{l \in Lk3l} g2_l = 1$$

$$\sum_{l \in Lk3l} g3_l = 4$$

$$g1_l = \begin{cases} 1 - \text{jeżeli dla litery } l \text{ } wl_l = 1 \\ 0 - \text{inaczej} \end{cases}$$

$$g2_l = \begin{cases} 1 - \text{jeżeli dla litery } l \text{ } wl_l = 2 \\ 0 - \text{inaczej} \end{cases}$$

$$g3_l = \begin{cases} 1 - \text{jeżeli dla litery } l \text{ } wl_l = 3 \\ 0 - \text{inaczej} \end{cases}$$

$$g1_l \in \{0, 1\}$$

$$g2_l \in \{0, 1\}$$

$$g3_l \in \{0, 1\}$$

$$z_b \in \{0, 1\}$$

$$wl_l \in \{0, 1, 3\}$$

W zaprezentowanym modelu na podstawie zmiennych decyzyjnych każda z liter przypisywana jest do jednej z trzech grup (zaprezentowanych na rysunku 136). Przypisanie to ma na celu minimalizację częstości występowania bigramów, których litery znajdują się w skrajnych rzędach (funkcja celu). Ponieważ każda z grup ma z góry narzuconą liczbę (podyktowaną liczbą klawiszy w danym rzędzie, do których litery będą przypisywane), wprowadzone zostały trzy ograniczenia – po jednym dla każdej grupy.

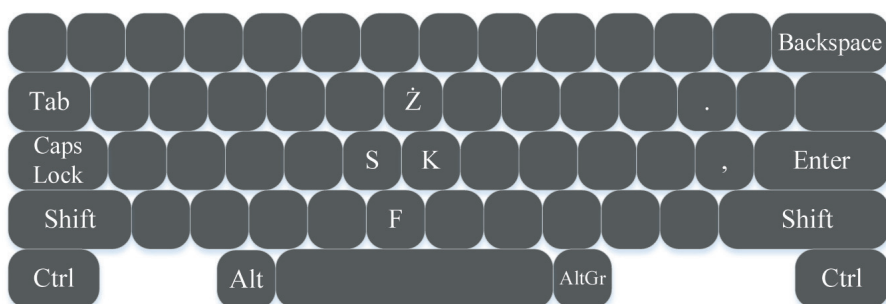
W wyniku rozwiązania powyższego modelu decyzyjnego (i analogicznego dla ręki prawej) otrzymano następujący podział liter:

1. Dla ręki lewej:
 - grupa 2.1: u, a, ś, ó, ć;
 - grupa 2.2: s;
 - grupa 2.3: ę, y, h, r;
2. Dla ręki prawej:
 - grupa 2.1: t, m, p, j;
 - grupa 2.2: k;
 - grupa 2.3: d, l, ł, b, g.

Zaprezentowany podział jest wynikiem obliczeń, w których uwzględnione zostało położenie dwóch liter, które na tym etapie przypisane zostały już do konkretnych klawiszy, tj. liter: „F” oraz „Ż”.

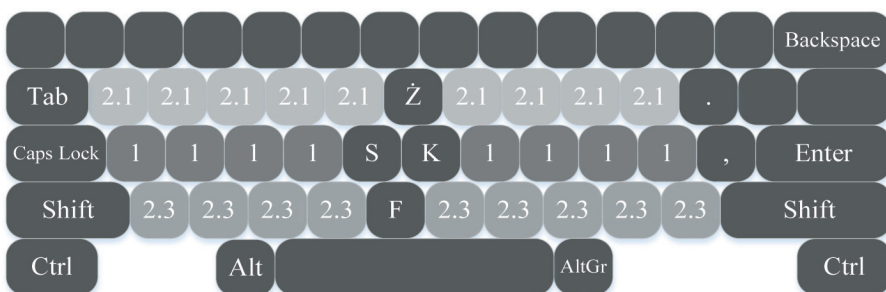
Statystyczna częstość wpisywania bigramów ze skrajnych rzędów wynosi dla lewej ręki 0,34%, natomiast dla prawej – 0,29%. Oznacza to, że średnio mniej niż 1 na 150 bigramów będzie składał się z liter położonych w rzędzie pierwszym i trzecim i litery te będą przypisane do tej samej ręki.

Po przeprowadzeniu obliczeń dla kryterium IV modelu optymalizacji rozmieszczenia znaków zostały przypisane do konkretnych klawiszy dwie kolejne litery, tj. „S” oraz „K”. Znaki, które na podstawie kryteriów I–IV przypisano do konkretnych klawiszy, zaprezentowano na rysunku 137.



Rys. 137. Znaki przypisane do konkretnych klawiszy na podstawie kryteriów I-IV

Kryterium V dotyczy podziału nieprzypisanych liter w taki sposób, aby częstość bigramów wpisywanych tym samym palcem jednej ręki była jak najmniejsza. Dla każdego palca stworzono osobną grupę liter, do której przydzielano elementy z wyznaczonych już grup (na podstawie kryteriów I-IV). Grupy te zostały przedstawione na rysunku 138.



Rys. 138. Grupy znaków utworzone na podstawie kryteriów I-IV

Dla każdej z rąk utworzono cztery grupy, które na dalszym etapie optymalizacji przypisano do poszczególnych palców (każda grupa zawierać będzie znaki przypisane do pojedynczego palca). Trzy grupy liczyły po trzy elementy, natomiast grupa 4 (która będzie przypisana do palca wskazującego) liczy cztery elementy (ponieważ do dwóch z sześciu obsługiwanych przez palec wskazujący klawiszy litery zostały już przypisane).

Zaprezentowany model decyzyjny dla kryterium V jest analogiczny dla obydwu rąk. Jedyna istotna różnica (podobnie jak w modelu decyzyjnym dla kryterium IV) polega na tym, że w skład grupy 4 (liczącej cztery elementy) w przypadku lewej ręki będą wchodzić dwie litery z grupy 2.1, natomiast dla prawej ręki będą to dwie litery z grupy 2.3. Z tego względu przedstawiony zostanie tylko model dla jednej z rąk – ręki lewej.

Model 5. Minimalizacja częstości liter wpisywanych tym samym palcem

Oznaczenia zmiennych:

- B – zbiór bigramów;
- L – zbiór 35 liter;
- $Lk5l$ – zbiór 15 liter wyznaczonych na podstawie kryteriów I i II przypisanych do ręki lewej, gdzie $Lk5l \subset L$;
- $Lk5lo$ – zbiór 13 liter wyznaczonych na podstawie kryteriów I i II przypisanych do ręki lewej, bez liter, które zostały już przypisane do klawiszy, tj. „S” i „F”, gdzie $Lk5lo \subset Lk5l$;
- b – pojedynczy bigram: $b = \{l_{b1}, l_{b2}\}$, gdzie l_{b1}, l_{b2} oznaczają odpowiednio pierwszą i drugą literę bigramu $b, b \in B$;
- l – pojedyncza litera, $l \in L$;
- cz_b – częstość występowania bigramu b .

Zmienne decyzyjne:

$$p_l = \begin{cases} 1 - \text{jeżeli litera } l \text{ przypisana jest do grupy 1} \\ 2 - \text{jeżeli litera } l \text{ przypisana jest do grupy 2} \\ 3 - \text{jeżeli litera } l \text{ przypisana jest do grupy 3} \\ 4 - \text{jeżeli litera } l \text{ przypisana jest do grupy 4} \end{cases}$$

gdzie p_l – zmienna oznaczająca przydział l -tej litery do jednej z czterech grup (p_1, p_2, p_3 lub p_4).

$$p1_l = \begin{cases} 1 - \text{jeżeli dla litery } l \text{ } p_l = 1 \\ 0 - \text{inaczej} \end{cases}$$

$$p2_l = \begin{cases} 1 - \text{jeżeli dla litery } l \text{ } p_l = 2 \\ 0 - \text{inaczej} \end{cases}$$

$$p3_l = \begin{cases} 1 - \text{jeżeli dla litery } l \text{ } p_l = 3 \\ 0 - \text{inaczej} \end{cases}$$

$$p4_l = \begin{cases} 1 - \text{jeżeli dla litery } l \text{ } p_l = 4 \\ 0 - \text{inaczej} \end{cases}$$

$$v_b = \begin{cases} 1 - \text{jeżeli } p_{l_{b1}} = p_{l_{b2}} \\ 0 - \text{inaczej} \end{cases}$$

gdzie v_b – zmienna binarna opisująca, czy dany bigram (b) składa się z liter (l) obsługiwanych przez ten sam palec.

$$Rz1_l = \begin{cases} 1 - \text{jeżeli dla litery } l \text{ } Rz_l = 1 \\ 0 - \text{inaczej} \end{cases}$$

$$Rz2_l = \begin{cases} 1 - \text{jeżeli dla litery } l \text{ } Rz_l = 2 \\ 0 - \text{inaczej} \end{cases}$$

$$Rz3_l = \begin{cases} 1 - \text{jeżeli dla litery } l \text{ } Rz_l = 3 \\ 0 - \text{inaczej} \end{cases}$$

gdzie Rz_l – rząd, do którego litera l została przypisana (podgrupa 2.1 to rząd 1, podgrupa 2.2 to rząd 2, natomiast podgrupa 2.3 to rząd 3).

Funkcja celu:

$$\sum_{b \in B} v_b \cdot cz_b \rightarrow \min$$

Ograniczenia:

$$p_{„f”} = 4$$

$$p_{„s”} = 4$$

$$\sum_{l \in Lk5lo} p1_l = 3$$

$$\sum_{l \in Lk5lo} p2_l = 3$$

$$\sum_{l \in Lk5lo} p3_l = 3$$

$$\sum_{l \in Lk5lo} p4_l = 4$$

$$\sum_{l \in Lk5lo} p1_l \cdot rz1_l = 1$$

$$\sum_{l \in Lk5lo} p1_l \cdot rz2_l = 1$$

$$\sum_{l \in Lk5lo} p1_l \cdot rz3_l = 1$$

$$\sum_{l \in Lk5lo} p2_l \cdot Rz1_l = 1$$

$$\sum_{l \in Lk5lo} p2_l \cdot Rz2_l = 1$$

$$\sum_{l \in Lk5lo} p2_l \cdot Rz3_l = 1$$

$$\sum_{l \in Lk5lo} p3_l \cdot Rz1_l = 1$$

$$\sum_{l \in Lk5lo} p3_l \cdot Rz2_l = 1$$

$$\sum_{l \in Lk5lo} p3_l \cdot Rz3_l = 1$$

$$\sum_{l \in Lk5lo} p4_l \cdot Rz1_l = 2$$

$$\sum_{l \in Lk5lo} p4_l \cdot Rz2_l = 1$$

$$\sum_{l \in Lk5lo} p4_l \cdot Rz3_l = 1$$

$$p1_l \in \{0, 1\}$$

$$p2_l \in \{0, 1\}$$

$$p3_l \in \{0, 1\}$$

$$p4_l \in \{0, 1\}$$

$$Rz1_l \in \{0, 1\}$$

$$Rz2_l \in \{0, 1\}$$

$$Rz3_l \in \{0, 1\}$$

$$v_b \in \{0, 1\}$$

$$p_l \in \{1, 2, 3, 4\}$$

Zadaniem funkcji celu w zaprezentowanym modelu jest minimalizacja częstości bigramów pisanych tym samym palcem. Duża liczba ograniczeń w modelu wynika

z tego, że każda tworzona grupa liter musi mieć określoną licznosc, a dodatkowo w każdej grupie musi się znaleźć dokładnie jedna litera z rzędu pierwszego (poza grupą palca wskazującego, dla którego są to dwie litery), jedna litera z rzędu drugiego (środkowego) oraz jedna litera z rzędu trzeciego (dolnego).

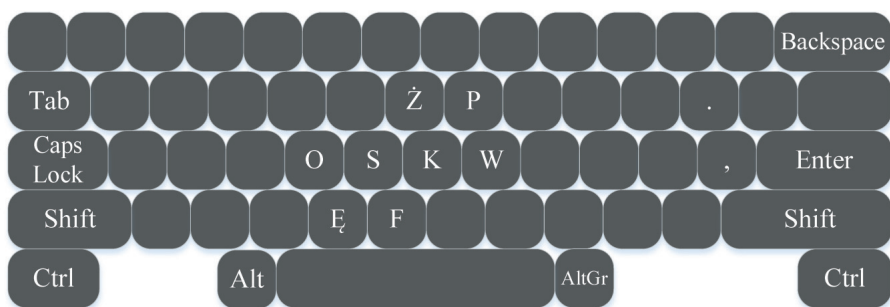
W tabeli 21 przedstawiono podział liter na grupy minimalizujący częstość wpisywania dwóch liter z tej samej grupy. Dzielenie litery na grupy, uwzględniono dokonany już podział na podstawie kryteriów I–IV, a także litery, które zostały już przypisane do konkretnych klawiszy.

Tabela 21
Podział liter na grupy

Grupa	Lewa ręka	Prawa ręka
1	u, e, h	t, z, l
2	ą, a, y	c, m, d
3	ś, i, r	j, n, ł
4	s, f, ó, ć, o, ę	ż, k, p, w, b, g

Zgodnie z zaprezentowanym w tabeli 21 podziałem częstość bigramów wpisywanych tym samym palcem wyniosła 1,05% dla lewej ręki oraz 0,32% dla prawej. Palec wskazujący, który obsługuje 6 z 15 (dla każdej z rąk) rozważanych klawiszy, odpowiada za wpisywanie obydwu liter danego bigramu o sumarycznej częstości 0,76% dla lewej ręki oraz 0,14% dla prawej.

Na podstawie kryterium V położenie kolejnych czterech liter zostało jednoznacznie zdefiniowane. Na rysunku 139 przedstawiono projektowany układ klawiatury z naniesionymi znakami, które w sposób jednoznaczny przypisane są do danego klawisza.



Rys. 139. Znaki przypisane do konkretnych klawiszy na podstawie kryteriów I–V

Kryterium VI modelu optymalizacji maksymalizuje częstość występowania bigramów, których wpisywanie przebiega w kierunku od małego palca do palca wskazującego

(jeżeli są pisane jedną ręką). Ze względu na dokonane na podstawie poprzednich pięciu kryteriów podziały jednym z zadań tego kryterium jest przydzielenie wyznaczonych grup (tab. 21) do poszczególnych palców, czyli jednoznaczne przyporządkowanie litery do konkretnego klawisza.

Efekt obliczeń dla kryterium VI (przydział grup klawiszy do palców) został zamieszczony w tabeli 22.

Tabela 22
Przypisanie liter do obsługujących je palców

Palec	Ręka lewa		Ręka prawa	
	litery	częstość liter [%]	litery	częstość liter [%]
Mały palec	ą, a, y	10,63	c, m, d	13,61
Palec serdeczny	ś, i, r	9,81	t, z, l	11,48
Palec środkowy	u, e, h	11,60	j, n, ł	13,57
Palec wskazujący	s, f, ó, ć, o, ę	14,30	ż, k, p, w, b, g	14,70

Na podstawie kryterium VI rozmieszczone zostały także ostatnie nieprzypisane pary liter dla palców wskazujących (litery „Ó” oraz „Ć” dla palca wskazującego lewej ręki oraz „B” i „G” dla prawej).

Optymalizacja rozmieszczenia znaków została również przeprowadzona dla pięciu liter warstwy III. W tym celu wykorzystano kryteria II–VI.

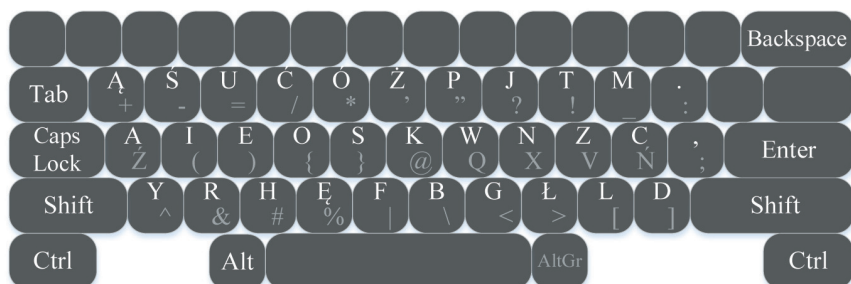
4.3. Projekt układu klawiatury

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń z wykorzystaniem zaprezentowanego w niniejszym rozdziale modelu optymalizacji rozmieszczenia znaków wyznaczony został układ klawiatury przedstawiony na rysunku 140.



Rys. 140. Zoptymalizowany układ klawiatury

Kolejny etap projektowania klawiatury to rozmieszczenie znaków nieliterowych. Znakki te znajdują się w warstwie III klawiatury, a więc ich wpisanie będzie wymagało wykorzystania klawisza AltGr. Na rysunku 141 przedstawiono położenie znaków nieliterowych na rozważanym fragmencie klawiatury.



Rys. 141. Zoptymalizowany układ klawiatury z dodatkowymi znakami

W prawej części rzędu górnego umieszczone zostały znaki wykorzystywane w codziennej korespondencji (m.in. znaki przestankowe oraz operatory arytmetyczne). Celem przedstawionego ustawienia znaków jest ułatwienie pisania dzięki umieszczeniu ich w miejscu, które nie będzie zasłonięte przez trzymane w rzędzie domowym palce (co może mieć znaczenie także dla osób zaznajomionych z układem ze względu na rzadkie wykorzystywanie rozważanych znaków). Znaki wykorzystywane w korespondencji nie zostały przypisane do części rzędu środkowego obsługiwanego przez lewą rękę, ponieważ analogicznie do znaków „.” oraz „,” znaki „?” oraz „!” występują głównie po ostatniej literze danego słowa, która najczęściej jest samogłoską, a więc korzystniej jest (ze względu na naprzemienność pisania) przypisać te znaki do prawej ręki.

W pozostałej części klawiatury znajdują się znaki, które mogą być wykorzystane do pisania kodów programów (m.in. różne rodzaje nawiasów). Wiele z zamieszczonych w prezentowanym układzie znaków zostało zdublowanych względem rzędu numerycznego. Zabieg ten miał na celu ułatwienie dostępu do tych znaków przez zmniejszenie odległości, jaką muszą pokonać palce w celu wpisania danego znaku. Autor zdecydował się na wprowadzenie opisanej modyfikacji ze względu na częste wykorzystywanie zdublowanych znaków m.in. w różnych językach programowania.

Jak zaznaczono w poprzednim podrozdziale, prezentowany układ dotyczy uniwersalnej części klawiatur, których rozmieszczenie klawiszy zgodne jest z normą ISO/IEC 9995-2. Na rysunkach 142–144 przedstawiono zaprojektowany układ, który został naniesiony na różne układy klawiatur. Klawiszom, do których nie przypisano żadnych znaków (na podstawie części uniwersalnej zaprojektowanego układu), przyporządkowano następujące kombinacje znaków:

- litera „Ž” oraz w warstwie III znak „fi” (K1);
- litera „Ń” oraz w warstwie III znak „\$” (K2).



Rys. 142. Zoptymalizowany układ klawiatury (1)



Rys. 143. Zoptymalizowany układ klawiatury (2)



Rys. 144. Zoptymalizowany układ klawiatury (3)

Aby możliwe było jednoznaczne przyporządkowanie danej kombinacji do konkretnego klawisza (z nieprzypisanymi jeszcze znakami), sformułowane zostały następujące wytyczne dotyczące rozmieszczenia znaków (korespondujące z zaprezentowanym modelem optymalizacji):

- jeżeli to możliwe, kombinacja K1 powinna zostać przypisana do lewej ręki, natomiast kombinacja K2 do prawej;
- kombinacje powinny być umieszczane jak najbliżej klawiszy z przypisanymi już znakami.

Zaprezentowane układy stanowią przykłady klawiatur zgodnych z normą ISO/IEC 9995-2. W przedstawionych przypadkach litera „Ñ” przypisana jest zawsze do tego samego klawisza.

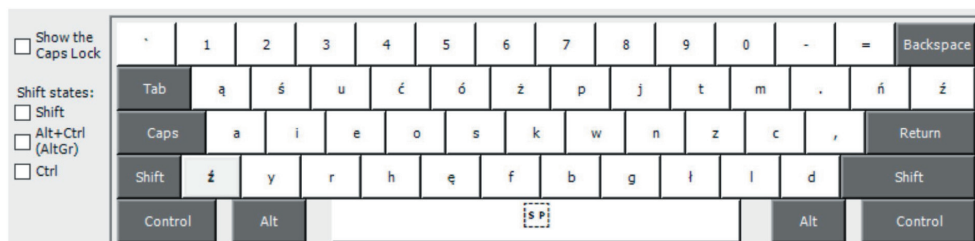
Gdyby klawisz ten został uwzględniony w modelu optymalizacyjnym, na podstawie kryteriów optymalizacji również przypisano by do niego literę „Ń”.

W dalszej części pracy przedstawione układy zostaną zaimplementowane w formie pozwalającej na ich wykorzystanie do pracy przy użyciu klawiatury komputera.

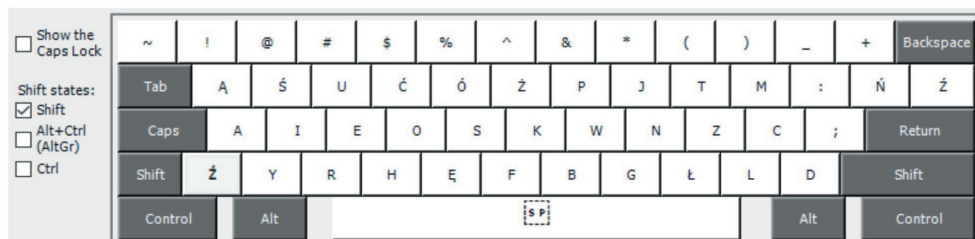
4.4. Implementacja projektu układu klawiatury

Zaprojektowany układ klawiatury został zaimplementowany w programie Microsoft Keyboard Layout Creator 1.4 [Microsoft 2007]. Wykorzystane oprogramowanie umożliwia tworzenie własnych układów klawiatury oraz edycję układów już istniejących, które można następnie instalować na innych urządzeniach wykorzystujących systemem operacyjny Windows.

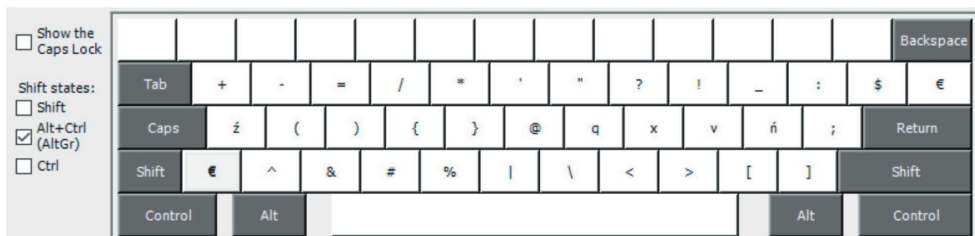
Przedstawiony w niniejszej monografii projekt układu został nazwany „PoLay” od słów *Polish Layout*. Na rysunkach 145–148 przedstawiono widoki kolejnych warstw układu PoLay pochodzące z programu Keyboard Layout Creator.



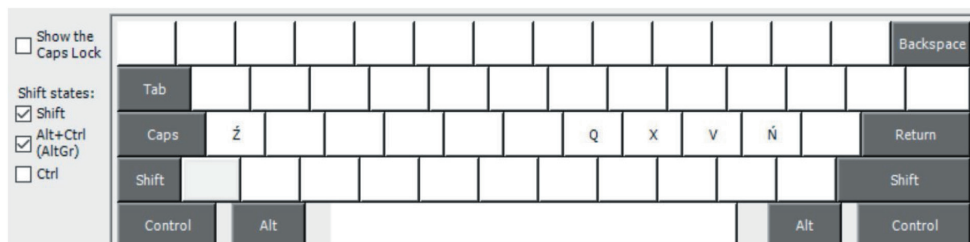
Rys. 145. Warstwa I układu PoLay



Rys. 146. Warstwa II układu PoLay



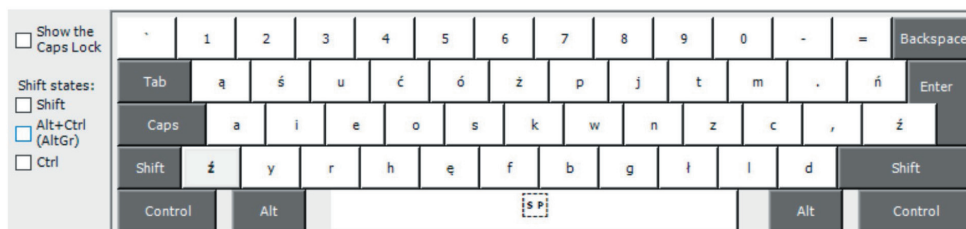
Rys. 147. Warstwa III układu PoLay



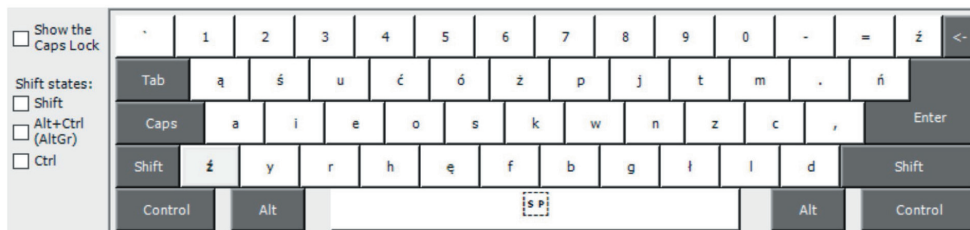
Rys. 148. Warstwa IV układu PoLay

Schemat układu klawiatury, na który nanoszony był układ PoLay, zawiera więcej klawiszy niż układ w prezentowanych w poprzednim podrozdziale przykładach. Celem takiego działania jest zapewnienie poprawnego przypisania znaków do klawiszy dla klawiatur zawierających tylko podzbiór klawiszy zaprezentowanego układu. W takim przypadku klawisze opracowanego układu, które nie znalazły się na danej klawiaturze, są podczas wykorzystywania klawiatury pomijane. W związku z tym zdublowano klawisz z literą „Ż”, co wynika m.in. z tego, że autor w momencie implementacji układu nie wiedział, na jakiej klawiaturze układ ten będzie wykorzystywany. Z drugiej strony podejście takie umożliwia stworzenie jednej wersji implementacji układu, uniwersalnej dla różnych klawiatur i działającej poprawnie również w przypadku, gdy np. obok lewego klawisza Shift nie zostanie umieszczony dodatkowy klawisz, do którego przypisana jest litera „Ż”.

Na rysunkach 149 oraz 150 przedstawiono rozmieszczenie znaków dla innych klawiatur zgodnych z normą ISO/IEC 9995-2. Przedstawione rozmieszczenia są automatycznie generowane przez program w zależności od wykorzystywanej klawiatury. Dzięki temu zaprogramowany układ będzie dynamicznie dostosowywany do rozmieszczenia klawiszy na konkretnej klawiaturze (zgodnej z przytoczoną normą).



Rys. 149. Alternatywna klawiatura z układem PoLay (1)



Rys. 150. Alternatywna klawiatura z układem PoLay (2)

Na zaprezentowanych rysunkach przedstawiających widok układu PoLay w programie Keyboard Layout Creator prawy klawisz Alt nie występuje pod nazwą AltGr, jednak w przypadku prezentowanego układu jego działanie odpowiada działaniu klawisza AltGr.

Zaprezentowana w niniejszym podrozdziale opracowania implementacja układu PoLay została zainstalowana i przetestowana na systemie operacyjnym Windows 10. Podczas przeprowadzonych testów nie stwierdzono żadnych błędów w działaniu układu PoLay.

4.5. Podsumowanie

Niniejszy rozdział opracowania został poświęcony modelowi optymalizacji rozmieszczenia znaków na klawiaturze komputera. Model optymalizacji powstał na podstawie przeprowadzonych badań empirycznych oraz badań literaturowych. Ze względu na specyfikę zawierającego wiele liter diakrytycznych języka polskiego, na przykładzie którego przeprowadzono badanie empiryczne, możliwe było m.in. wysnucie wniosku o wpływie klawisza AltGr na liczbę popełnianych podczas pisania błędów. Wniosek ten jest o tyle istotny, że gdyby analogiczne badania przeprowadzono w odniesieniu do języka angielskiego (który był wykorzystywany do większości przeprowadzanych badań dotyczących ergonomii klawiatury), niemożliwe byłoby wnioskowanie o przytoczonej zależności. Na tej podstawie można stwierdzić, że przy projektowaniu układów przeznaczonych dla języków zawierających litery diakrytyczne (takich jak język polski) powinno się uwzględniać także omówioną zależność.

Ze względu na brak możliwości opracowania wiarygodnych statystyk dotyczących częstości występowania konkretnych znaków nieliterowych (które mogą być silnie zależne np. od typu wykonywanej pracy, a w przypadku programistów także od wykorzystywanego języka programowania) autor nie przeprowadził na potrzeby ich rozmieszczenia procesu optymalizacji. Zaprezentowany model został wykorzystany wyłącznie do optymalizacji rozmieszczenia liter.

Wszystkie przedstawione w modelu kryteria optymalizacji sformułowano na podstawie przeprowadzonego badania empirycznego lub mają one źródło w literaturze przedmiotu. Wybór hierarchicznego modelu optymalizacji pozwolił na uzyskanie układu optymalnego ze względu na przyjęte kryteria. Implementacja przyjętego modelu optymalizacji wymagała zbudowania sześciu modeli decyzyjnych (część z nich była na tyle oczywista, że została pominięta w opracowaniu), które pozwoliły na jednoznaczne przypisanie każdej litery do konkretnego klawisza.

Kolejnym krokiem podczas projektowania układu było dodanie znaków nieliterowych. Ze względu na to, że tylko do dwóch klawiszy warstwy I nie zostały przypisane litery (poza znakami „. ” oraz „, ”), większość znaków nieliterowych przypisano do warstwy III klawiatury.

Powstały w opisany sposób układ (występujący w monografii pod nazwą PoLay) zaimplementowano w programie Keyboard Layout Creator 1.4. Przeprowadzone testy układu w środowisku Windows 10 potwierdziły poprawność działania implementacji.

Podsumowanie i wnioski

Przyczyną powstania niniejszego opracowania jest wciąż aktualny problem dostosowania klawiatury do potrzeb i wymogów osób korzystających z komputerów. Klawiatura jest, obok myszki, jednym z głównych narzędzi służących do komunikacji człowieka z komputerem. W związku z coraz powszechniejszym wykorzystaniem komputerów w wielu sferach życia zawodowego i osobistego człowieka problem ten wydaje się bardzo istotny.

Problem optymalizacji klawiatury jest wciąż poruszany w literaturze, np. w artykule Puki [2014] zawierający przegląd opracowań poświęconych tematyce rozmieszczenia znaków na klawiaturze. O tym, że jest to problem bardzo skomplikowany, ponieważ dotyczy interakcji człowieka (gdzie każdy człowiek jest fizycznie inny, ma inne przyzwyczajenia, nawyki itd.) z komputerem, mogą na przykład świadczyć opracowania autorstwa Puki i Łebkowskiego [2015, 2016].

Podjęta w niniejszym opracowaniu próba rozwiązania problemu rozmieszczenia znaków alfanumerycznych na klawiaturze komputera zakończona została zaprojektowaniem klawiatury dostosowanej do potrzeb języka polskiego – układu PoLay, przeznaczonego dla osób wykorzystujących wszystkie palce do obsługi klawiatury.

Treść opracowania podzielono na cztery rozdziały:

1. W rozdziale 1 przedstawiono wykorzystywane w pracy pojęcia dotyczące klawiatury komputerowej; zawarte w nim zostały także wyniki badania literaturowego.
2. Rozdział 2 zawiera informacje dotyczące metody projektowania badania empirycznego, stanowiącego podstawę do uzyskania danych niezbędnych podczas projektowania modelu optymalizacji rozmieszczenia znaków.
3. Kolejny rozdział obejmuje charakterystykę danych, jakie zostały pozyskane za pomocą przeprowadzonego badania empirycznego; rozdział ten zawiera także analizę zebranych danych.
4. Ostatni rozdział poświęcono opracowaniu modelu optymalizacji, a także zastosowaniu zaproponowanego modelu do zaprojektowania klawiatury dostosowanej do języka polskiego.

Celem pracy było przygotowanie modelu optymalizacji rozmieszczania znaków alfanumerycznych na klawiaturze pozwalającego uwzględnić specyfikę konkretnego języka. Cel ten został osiągnięty, czego dowodem jest zawarty w rozdziale 4 model optymalizacji. Danymi wejściowymi modelu są informacje dotyczące częstości występowania liter oraz bigramów w danym języku, co sprawia, że model uwzględnia specyfikę języka, dla którego układ jest optymalizowany. Wyniki realizacji celów częściowych przedstawiono w następujących fragmentach pracy:

- stan wiedzy o istniejących klawiaturach zaprezentowano w podrozdziale 1.3;
- statystyki częstości występowania liter i ich dwuliterowych kombinacji w języku polskim wraz z opisem metody wyznaczania statystyk przedstawiono w podrozdziale 3.3 oraz w *Załączniku nr 1*;
- opis badania empirycznego zawarto w rozdziale 2; w rozdziale 3 przedstawiono wyniki przeprowadzonego badania;
- kryteria optymalizacji występujące w literaturze przedstawiono w przeglądzie literatury (o ile było to możliwe, dla każdego analizowanego układu zawarte zostały kryteria optymalizacji tego układu); w podrozdziale 3.3 zaprezentowano kryteria wyznaczone na podstawie analizy wyników eksperymentu;
- zaprojektowany model optymalizacji zaprezentowano w podrozdziale 4.1, implementacji modelu poświęcony został podrozdział 4.2, natomiast prototyp układu dla języka polskiego przedstawiono w podrozdziale 4.4 (układ PoLay).

Zaprojektowany model optymalizacji rozmieszczania znaków alfanumerycznych na klawiaturze, uwzględniający specyfikę danego języka, umożliwia projektowanie układów spełniających wybrane kryteria efektywności wprowadzania treści w tym języku, co zostało potwierdzone w rozdziale 4. Przedstawiony model (podrozdział 4.1) składa się z sześciu kryteriów optymalizacji, z których każde ma na celu spełnienie wybranego kryterium efektywnościowego układu, np. kryterium maksymalizacji naprzemienności zwiększa szybkość pisania, a minimalizacja wykorzystania klawisza AltGr zmniejsza liczbę popełnianych błędów oraz ogranicza ruchy wykonywane przez palce. Od doboru kryteriów modelu optymalizacji zależy zatem, jakie kryteria efektywnościowe będą realizowane. Odwracając tę zależność, można stwierdzić, że dla wybranych kryteriów efektywnościowych możliwe jest wyznaczenie kryteriów optymalizacji, które pozwalają na realizację tych kryteriów (efektywnościowych). W zaproponowanym w pracy modelu wzięto pod uwagę cztery kryteria efektywnościowe: minimalizację liczby popełnianych błędów, maksymalizację szybkości pisania, minimalizację ruchu palców oraz zwiększenie ergonomii projektowanego układu. Aby możliwe było spełnianie tych kryteriów, należy przeprowadzić optymalizację rozmieszczenia znaków, dla której danymi wejściowymi są statystyki częstości występowania w danym języku (w rozważanym przypadku w języku polskim) liter oraz bigramów. Ze względu na różnice między

językami – nie tylko pod względem częstości występowania danego znaku, ale także liczby i rodzaju liter występujących w danym alfabecie – w optymalizacji klawiatury musi zostać uwzględniona specyfika danego języka, aby kryteria efektywnościowe mogły być spełnione.

Reasumując, w niniejszym opracowaniu wyznaczono kryteria optymalizacji, które pozwalają na spełnienie określonych kryteriów efektywnościowych wprowadzania treści. Ze względu na to, że danymi wejściowymi do przeprowadzenia optymalizacji, zgodnie z zadaną listą kryteriów, są statystyki częstości występowania liter oraz ich dwuliterowych kombinacji, aby możliwe było osiągnięcie zadanych kryteriów efektywnościowych, konieczna jest wiedza o specyfice języka, dla którego klawiatura jest projektowana.

W opracowaniu przyjęto trzy hipotezy badawcze:

1. Klawiatura QWERTY nie jest dostosowana do specyfiki języka polskiego.
2. Nie wszystkie występujące w literaturze kryteria optymalizacji rozmieszczenia klawiszy klawiatury są poprawne.
3. Dobór treści badania empirycznego (polegającego na przepisywaniu fragmentu tekstu) ma wpływ na otrzymane wyniki, stanowiące podstawę wyznaczenia kryteriów optymalizacji klawiatury.

Prawdziwość pierwszej z hipotez, która była także przedmiotem artykułu Łebkowski i Puki [2013], można udowodnić na podstawie zaprezentowanego modelu optymalizacji. Jak wykazano w podrozdziale 3.3, używanie klawisza AltGr zwiększa prawdopodobieństwo popełnienia błędu podczas pisania, dlatego też należy minimalizować wykorzystanie warstwy III i IV (których użycie wymaga wciśnięcia klawisza AltGr) na rzecz warstwy I i II. Klawiatura QWERTY, jak również inne układy klawiatur, które nie są dostosowane do specyfiki języka polskiego, wykorzystuje klawisz AltGr do wprowadzania wszystkich liter diakrytycznych. Średnio 6,95% wszystkich wpisywanych liter wymaga użycia klawisza AltGr. Oznacza to, że w przybliżeniu co 14 wpisywana litera wymaga wykorzystania klawisza AltGr, co w porównaniu z wynikiem uzyskanym przez zaprojektowany układ PoLay (mniej niż co 300 litera wymaga użycia AltGr) jest wynikiem świadczącym, że klawiatura QWERTY nie jest dostosowana do specyfiki języka polskiego. W tabeli 23 przedstawiono wyniki dla kryterium I (minimalizacja wykorzystania klawisza AltGr) uzyskane przez układy QWERTY, Dvoraka oraz układy dostosowane do języka polskiego. W przypadku układu Dvoraka metoda wpisywania znaków diakrytycznych, która determinuje także ich położenie, została zdefiniowana w sposób analogiczny do metody znanej z układu QWERTY, tj. w celu wpisania np. litery „Ł” należy jednocześnie wcisnąć klawisz AltGr oraz klawisz oznaczony literą „L”.

Tabela 23

Wyniki wybranych układów dla kryterium I
modelu optymalizacji rozmieszczenia znaków [%]

Kryterium	QWERTY	Dvorak	Kotas	„Polski uniwersalny”	Zubrzycka	PoLay
I (min.)	6,95	6,95	2,63	2,18	0,66	0,32

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, które klawiatury zawierają polskie znaki diakrytyczne. Na uwagę zasługuje układ Zubrzyckiej, dla którego osiągnięty wynik jest, poza klawiaturą PoLay, zdecydowanie wyróżniającym się na tle pozostałych. Należy zaznaczyć, że w tym układzie litery „X” oraz „Q” zostały umieszczone w wierszu numerycznym. Układ PoLay uzyskał najkorzystniejszy wynik dla rozważanego kryterium.

O niedostosowaniu klawiatury QWERTY do języka polskiego świadczy również wynik uzyskany dla kryterium naprzemienności pisania, wynoszący tylko 53,57%. W przypadku języka polskiego podczas używania układu QWERTY zaledwie nieco ponad połowa bigramów wpisywana będzie za pomocą obydwu rąk. W przypadku układu PoLay wynik naprzemienności pisania wyniósł blisko 73% i jest to najlepszy wynik spośród uzyskanych przez analizowane układy. W tabeli 24 przedstawiono wyniki pozostałych klawiatur dla kryterium II (maksymalizacja naprzemienności pisania).

Tabela 24

Wyniki wybranych układów dla kryterium II
modelu optymalizacji rozmieszczenia znaków [%]

Kryterium	QWERTY	Dvorak	Kotas	„Polski uniwersalny”	Zubrzycka	PoLay
II (maks.)	53,57	66,76	57,97	50,16	72,73	72,99

Wyróżniającą się klawiaturą jest ponownie klawiatura Zubrzyckiej, która uzyskała wynik tylko nieco gorszy od układu PoLay. Bardzo dobry wynik osiągnęła również klawiatura Dvoraka, która pod względem naprzemienności wyprzedziła pozostałe polskie układy.

Kolejne kryterium optymalizacji (minimalizacja ruchu palców) także potwierdza hipotezę o braku dostosowania QWERTY do specyfiki języka polskiego. Zaledwie co czwarty znak w układzie QWERTY nie wymaga wykonania ruchu palców z pozycji domyślnej. Dla układu PoLay osiągnięty wynik jest dwukrotnie lepszy (ponad połowa wpisywanych liter nie wymaga wykonania żadnego ruchu palców względem pozycji domyślnej) i jest najlepszy w badanej grupie klawiatur. Zestawienie wyników przedstawione zostało w tabeli 25.

Tabela 25

Wyniki wybranych układów dla kryterium III
modelu optymalizacji rozmieszczenia znaków [%]

Kryterium	QWERTY	Dvorak	Kotas	„Polski uniwersalny”	Zubrzycka	PoLay
III (maks.)	24,81	41,54	32,35	39,03	29,86	52,46

Pod względem kryterium III wynik uzyskany przez układ Zubrzyckiej odbiega od najlepszych wyników. Drugi w kolejności wynik uzyskał układ Dvoraka, który wyprzedził pod tym względem pozostałe polskie układy.

Przedstawione w tabelach 23–25 wyniki jednoznacznie wskazują na to, że układ QWERTY nie jest dostosowany do specyfiki języka polskiego. Na ich podstawie można także wnioskować, że układ PoLay jest zdecydowanie najlepiej dostosowany (pod kątem przytoczonych kryteriów) do wpisywania treści w języku polskim. W każdym z wymienionych kryteriów układ PoLay uzyskał najlepszy wynik.

W rozdziale 1 autor wskazuje, że w literaturze występują kryteria, które się wzajemnie wykluczają. Na tej podstawie można stwierdzić, że niektóre z nich są błędne. Przeprowadzona analiza wyników eksperymentu daje także podstawy do uznania, że wysunięte przez Dvoraka i Dealeya wnioski dotyczące szybkości pisania liter w poszczególnych rzędach (litery rzędu domowego są wpisywane najszybciej, natomiast rząd dolny jest najwolniejszy) nie są prawdziwe. Jak wskazano w podrozdziale 3.3, szybkość wpisywania danej litery jest zależna od częstości jej występowania w danym języku, a nie od tego, w którym z trzech rzędów umiejscowiona jest na klawiaturze. W związku tym, ponieważ statystycznie najczęściej wykorzystywane są litery wiersza górnego, to właśnie średni czas wpisania litery z wiersza górnego jest mniejszy od średnich czasów dla wiersza środkowego oraz wiersza dolnego, co stoi w sprzeczności z postulatami Dvoraka i Dealeya. Można więc wnioskować, że układy tworzone na podstawie kryteriów Dvoraka i Dealeya zostały zoptymalizowane z wykorzystaniem kryterium, które nie znajduje potwierdzenia w badaniach empirycznych.

Warto w tym miejscu również zwrócić uwagę na pewne, zbyt ogólne zdaniem autora, kryteria pojawiające się w literaturze. Na przykład Kotas [Zubrzycka 1963] sformułował kryterium optymalizacji polegające na minimalizacji obciążenia pisaniem małego palca. Rozważając sytuację, w której obciążenie to wynosi np. 9% i jest równomiernie rozłożone pomiędzy wszystkie trzy rzędy, a także przypadek, dla którego obciążenie pisaniem małego palca jest równe 10%, z czego 8% to obciążenie rzędu domowego (którego wykorzystanie nie wymusza ruchu małego palca), można uznać, że druga z przytoczonych sytuacji jest korzystniejsza ze względu na mniejszy ruch wykonywany

przez mały palec pomimo statystycznie większego obciążenia palca. W związku z tym według autora przytoczone kryterium należałoby uznać za niedostatecznie szczegółowe.

Ostatnia hipoteza, która dotyczyła wpływu doboru treści na uzyskane wyniki, została potwierdzona wynikami zawartymi w rozdziale 3. Na podstawie tabeli 10 (średni czas pisania danego bloku tekstu) można wnioskować, że średnie czasy pisania dla różnych bloków tekstu są od siebie wyraźnie różne. Wpływ na uzyskane wyniki ma m.in. trudność wybranej do badania treści, ale także np. wykorzystanie znaków znajdujących się w rzędzie numerycznym. Należy także podkreślić, że pomimo różnic w średnim czasie wpisywania liter w poszczególnych blokach tekstu bardzo silna zależność czasu pisania od częstości występowania danej litery (w obrębie pojedynczego bloku) wystąpiła w przypadku każdego z bloków.

Najważniejszymi efektami niniejszego opracowania są model optymalizacji rozmieszczenia liter oraz utworzony na jego podstawie układ PoLay. Zaproponowany model obejmuje jedynie rozmieszczenie liter, jednak możliwe jest jego rozbudowanie o rozmieszczenie również pozostałych znaków nieliterowych. W tym celu konieczne byłoby zbudowanie statystyk częstości występowania tych znaków, które jednak byłyby obciążone bardzo dużym stopniem niepewności, ze względu na metodę doboru próby tekstów do analizy – nawet statystyki budowane jedynie dla programistów różniłyby się diametralnie w zależności od wykorzystywanego języka programowania. Dlatego też autor nie podjął się opracowania statystyk częstości występowania znaków nieliterowych.

Znaki rzędu numerycznego w zaprojektowanym układzie rozmieszczone są analogicznie jak w układzie QWERTY. Przyczynił się do tego brak przesłanek do przeprowadzenia modyfikacji rzędu numerycznego. Drugim argumentem przemawiającym za brakiem reorganizacji rzędu numerycznego jest przykład klawiatury Dvoraka, w której kolejność cyfr w rzędzie numerycznym została zmieniona. W najpopularniejszej wersji klawiatury Dvoraka rząd numeryczny jest analogiczny do rzędu numerycznego klawiatury QWERTY, jednak wersja klawiatury Dvoraka dla programistów (*Programmer Dvorak*) w dalszym ciągu zawiera zmodyfikowany rząd numeryczny, w którym cyfry występują w następującej kolejności: 7, 5, 3, 1, 9, 0, 2, 4, 6, 8. Modyfikacja ta nie została wprowadzona do najpopularniejszego układu Dvoraka.

Zaproponowany układ PoLay jest jedynym układem (na podstawie przeprowadzonych badań literaturowych z uwzględnieniem wyłącznie układów dostosowanych do języków opartych na alfabecie łacińskim), w którym litery „X”, „Q” oraz „V” nie są umieszczone w warstwie I klawiatury, co pozwoliło na uwzględnienie liter diakrytycznych języka polskiego, których częstość występowania jest większa od częstości wspominanych liter.

Autor zdecydował się na umieszczenie w warstwie III maksymalnie wielu znaków nieliterowych. Zabieg ten miał na celu ułatwienie wprowadzania tych znaków osobom (np. programistom), które znaki nieliterowe często wykorzystują podczas pracy na komputerze.

Zdaniem autora układ PoLay jest zdecydowanie lepiej dostosowany do specyfiki języka polskiego niż klawiatura QWERTY, o czym mogą świadczyć osiągnięte przez układ PoLay wyniki przedstawione w niniejszej monografii. Dlatego zasadne wydaje się rozpoczęcie dyskusji o możliwości zastąpienia klawiatury QWERTY układem, który będzie wygodniejszy i bardziej efektywny dla osób piszących w języku polskim. Ważnym aspektem przy podejmowaniu tematyki zmiany układu klawiatury mogłaby np. okazać się modyfikacja obowiązującego standardu. Ciekawą ideą zdaniem autora jest propozycja, którą zawarli w swoim artykule Rakhmetulla i współpracownicy [2020]. Również zaproponowane w artykule Puki i innych [2021] ujednolicenie klawiatur komputerowych oraz klawiatur urządzeń mobilnych wydaje się interesującym kierunkiem możliwego rozwoju klawiatur.

Załącznik nr 1

Częstość bigramów w języku polskim

Bigram	Częstość występowania [%]	Bigram	Częstość występowania [%]	Bigram	Częstość występowania [%]	Bigram	Częstość występowania [%]
aa	0,002	fw	0,000	no	0,349	ui	0,001
aą	0,000	fy	0,001	nó	0,023	uj	0,199
ab	0,138	fz	0,000	np	0,002	uk	0,053
ac	0,535	fż	0,000	nr	0,007	ul	0,036
ác	0,250	fż	0,000	ns	0,041	uł	0,017
ad	0,345	fx	0,000	nś	0,000	um	0,116
ae	0,001	fv	0,000	nt	0,103	un	0,060
aę	0,000	fq	0,000	nu	0,063	uń	0,002
af	0,020	ga	0,099	nw	0,004	uo	0,002
ag	0,063	gą	0,016	ny	0,312	uó	0,000
ah	0,003	gb	0,000	nz	0,001	up	0,064
ai	0,007	gc	0,000	nż	0,000	ur	0,098
aj	0,452	gć	0,000	nż	0,001	us	0,239
ak	0,855	gd	0,170	nx	0,000	uś	0,016
al	0,498	ge	0,021	nv	0,000	ut	0,106
ał	0,726	gę	0,074	nq	0,000	uu	0,000
am	0,764	gf	0,000	ña	0,000	uw	0,047
an	0,759	gg	0,000	ñą	0,000	uy	0,000
ań	0,061	gh	0,001	ñb	0,000	uz	0,022
ao	0,002	gi	0,077	ñc	0,051	uż	0,001
aó	0,000	gj	0,000	ñć	0,000	uż	0,154
ap	0,140	gk	0,000	ñd	0,000	ux	0,000
ar	0,449	gl	0,066	ñe	0,000	uv	0,000
as	0,544	gł	0,111	ñę	0,000	uq	0,000
aś	0,087	gm	0,006	ñf	0,000	wa	0,596
at	0,335	gn	0,027	ñg	0,000	wą	0,022
au	0,033	gń	0,000	ñh	0,000	wb	0,001
aw	0,442	go	0,777	ñi	0,000	wc	0,084
ay	0,004	gó	0,039	ñj	0,000	wć	0,000
az	0,279	gp	0,000	ñk	0,001	wd	0,109

Załącznik nr 1 cd.

Bigram	Częstość występowania [%]	Bigram	Częstość występowania [%]	Bigram	Częstość występowania [%]	Bigram	Częstość występowania [%]
aż	0,009	gr	0,092	ńl	0,000	we	0,198
az	0,142	gs	0,000	ńł	0,000	wę	0,025
ax	0,000	gś	0,000	ńm	0,000	wf	0,000
av	0,001	gt	0,000	ńn	0,000	wg	0,000
aq	0,000	gu	0,027	ńń	0,000	wh	0,001
aa	0,000	gw	0,007	ño	0,000	wi	1,335
aał	0,000	gy	0,000	ńó	0,000	wj	0,000
ab	0,002	gz	0,002	ńp	0,000	wk	0,025
ac	0,109	gż	0,000	ńr	0,000	wl	0,003
ac	0,028	gż	0,000	ńs	0,044	wł	0,079
ad	0,181	gx	0,000	ńś	0,000	wm	0,000
ae	0,000	gv	0,000	ńt	0,000	wn	0,159
ae	0,000	gq	0,000	ńu	0,000	wń	0,000
af	0,000	ha	0,128	ńw	0,000	wo	0,372
ag	0,023	hał	0,000	ńy	0,000	wó	0,067
ah	0,000	hb	0,000	ńz	0,000	wp	0,013
ai	0,000	hc	0,190	ńż	0,000	wr	0,074
aj	0,000	hc	0,000	ńż	0,000	ws	0,289
ak	0,003	hd	0,000	ńx	0,000	wś	0,005
al	0,000	he	0,038	ńv	0,000	wt	0,023
al	0,021	he	0,030	ńq	0,000	wu	0,022
am	0,000	hf	0,000	oa	0,003	ww	0,000
an	0,000	hg	0,000	oał	0,000	wy	0,401
an	0,000	hh	0,000	ob	0,673	wz	0,025
ao	0,000	hi	0,018	oc	0,273	wż	0,000
ao	0,000	hj	0,000	oc	0,007	wż	0,000
ap	0,005	hk	0,000	od	0,612	wx	0,000
ar	0,000	hl	0,003	oe	0,002	wv	0,000
as	0,003	hł	0,027	oę	0,000	wq	0,000
as	0,005	hm	0,008	of	0,023	ya	0,001

Załącznik nr 1 cd.

Bigram	Częstość występowania [%]	Bigram	Częstość występowania [%]	Bigram	Częstość występowania [%]	Bigram	Częstość występowania [%]
at	0,031	hn	0,011	og	0,224	ya	0,000
au	0,000	hñ	0,000	oh	0,013	yb	0,116
aw	0,000	ho	0,184	oi	0,076	yc	0,307
ay	0,000	hó	0,011	oj	0,305	yć	0,140
az	0,020	hp	0,000	ok	0,240	yd	0,050
aż	0,000	hr	0,013	ol	0,240	ye	0,001
ąż	0,029	hs	0,000	oł	0,063	yę	0,000
ax	0,000	hś	0,001	om	0,247	yf	0,006
av	0,000	ht	0,001	on	0,424	yg	0,063
aq	0,000	hu	0,016	oń	0,059	yh	0,000
ba	0,263	hw	0,032	oo	0,005	yi	0,001
bą	0,044	hy	0,043	oó	0,000	yj	0,112
bb	0,003	hz	0,000	op	0,141	yk	0,086
bc	0,019	hź	0,000	or	0,312	yl	0,157
bć	0,000	hż	0,000	os	0,478	ył	0,249
bd	0,001	hx	0,000	oś	0,295	ym	0,402
be	0,081	hv	0,000	ot	0,245	yn	0,136
bę	0,157	hq	0,000	ou	0,003	yń	0,003
bf	0,000	ia	0,780	ow	0,805	yo	0,004
bg	0,000	ią	0,168	oy	0,000	yó	0,000
bh	0,000	ib	0,015	oz	0,190	yp	0,043
bi	0,489	ic	0,356	oż	0,002	yr	0,019
bj	0,002	ić	0,162	oź	0,251	ys	0,328
bk	0,018	id	0,140	ox	0,000	yś	0,167
bl	0,046	ie	4,564	ov	0,003	yt	0,089
bł	0,016	ię	1,185	oq	0,000	yu	0,000
bm	0,002	if	0,002	óa	0,000	yw	0,100
bn	0,022	ig	0,053	óa	0,000	yy	0,000
bń	0,000	ih	0,000	ób	0,064	yz	0,032
bo	0,207	ii	0,028	óc	0,054	yź	0,002

Załącznik nr 1 cd.

Bigram	Częstość występowania [%]	Bigram	Częstość występowania [%]	Bigram	Częstość występowania [%]	Bigram	Częstość występowania [%]
bó	0,022	ij	0,046	óc	0,002	yż	0,017
bp	0,000	ik	0,099	ód	0,032	yx	0,000
br	0,270	il	0,134	óe	0,000	yv	0,000
bs	0,009	ił	0,191	óę	0,000	yq	0,000
bś	0,000	im	0,257	óf	0,000	za	0,925
bt	0,000	in	0,298	óg	0,032	zą	0,118
bu	0,083	iń	0,005	óh	0,000	zb	0,037
bw	0,001	io	0,118	ói	0,000	zc	0,122
by	0,607	ió	0,016	ój	0,135	zc	0,000
bz	0,003	ip	0,006	ók	0,008	zd	0,062
bż	0,000	ir	0,024	ól	0,037	ze	1,220
bż	0,000	is	0,276	ół	0,042	zẹ	0,214
bx	0,000	iś	0,117	óm	0,000	zf	0,000
bv	0,000	it	0,063	ón	0,000	zg	0,042
bq	0,000	iu	0,075	ón	0,000	zh	0,000
ca	0,152	iw	0,093	óo	0,000	zi	1,029
cą	0,020	iy	0,000	óó	0,000	zj	0,027
cb	0,000	iz	0,035	óp	0,001	zk	0,081
cc	0,001	iż	0,000	ór	0,185	zl	0,009
cć	0,000	iż	0,037	ós	0,005	zł	0,113
cd	0,000	ix	0,001	ós	0,000	zm	0,083
ce	0,275	iv	0,002	ót	0,009	zn	0,274
cẹ	0,063	iq	0,000	óu	0,000	zń	0,000
cf	0,000	ja	0,658	ów	0,290	zo	0,260
cg	0,000	ją	0,205	óy	0,000	zó	0,012
ch	1,073	jb	0,007	óz	0,008	zp	0,034
ci	1,003	jc	0,052	óz	0,018	zr	0,115
cj	0,136	jć	0,000	óż	0,045	zs	0,004
ck	0,045	jd	0,055	óx	0,000	zś	0,000
cl	0,001	je	1,307	óv	0,000	zt	0,038

Załącznik nr 1 cd.

Bigram	Częstość występowania [%]	Bigram	Częstość występowania [%]	Bigram	Częstość występowania [%]	Bigram	Częstość występowania [%]
cł	0,001	ję	0,160	óq	0,000	zu	0,138
cm	0,001	jf	0,000	pa	0,444	zw	0,118
cn	0,013	ję	0,002	pą	0,001	zy	1,034
cń	0,000	jh	0,000	pb	0,000	zz	0,001
co	0,491	ji	0,066	pc	0,015	żż	0,000
có	0,035	jj	0,000	pć	0,000	żż	0,000
cp	0,000	jk	0,005	pd	0,000	zx	0,000
cr	0,001	jl	0,017	pe	0,124	zv	0,000
cs	0,000	jł	0,000	pę	0,009	zq	0,000
cś	0,000	jm	0,036	pf	0,000	ża	0,000
ct	0,006	jn	0,053	pg	0,000	żą	0,000
cu	0,048	jń	0,000	ph	0,001	żb	0,001
cw	0,000	jo	0,018	pi	0,298	żc	0,008
cy	0,165	jó	0,003	pj	0,000	żć	0,011
cz	1,186	jp	0,008	pk	0,007	żd	0,003
cź	0,000	jr	0,018	pl	0,038	że	0,000
cż	0,000	js	0,064	pł	0,028	żę	0,000
cx	0,000	jś	0,033	pm	0,000	żf	0,000
cv	0,000	jt	0,002	pn	0,022	żg	0,000
cq	0,000	ju	0,143	pń	0,000	żh	0,000
ća	0,000	jw	0,010	po	1,162	żi	0,000
ćą	0,000	jy	0,000	pó	0,078	żj	0,000
ćb	0,001	jz	0,000	pp	0,001	żk	0,000
ćc	0,000	jż	0,000	pr	1,018	żl	0,019
ćć	0,000	jż	0,002	ps	0,036	żł	0,000
ćd	0,001	jx	0,000	pś	0,000	żm	0,014
će	0,000	jv	0,000	pt	0,006	żn	0,027
ćę	0,000	jq	0,000	pu	0,049	żń	0,001
ćf	0,000	ka	0,467	pw	0,000	żo	0,000
ćg	0,000	ką	0,062	py	0,042	żó	0,000

Załącznik nr 1 cd.

Bigram	Częstość występowania [%]	Bigram	Częstość występowania [%]	Bigram	Częstość występowania [%]	Bigram	Częstość występowania [%]
ch	0,000	kb	0,013	pz	0,001	żp	0,000
ci	0,000	kc	0,022	pż	0,000	żr	0,002
ćj	0,000	kć	0,000	pż	0,000	żs	0,000
ck	0,000	kd	0,000	px	0,000	żś	0,000
cl	0,000	ke	0,007	pυ	0,000	żt	0,000
ćł	0,000	kę	0,039	pq	0,000	žu	0,000
cm	0,002	kf	0,000	ra	0,968	żw	0,003
cn	0,000	kg	0,000	ra	0,025	ży	0,000
ćń	0,000	kh	0,000	rb	0,014	żz	0,000
co	0,000	ki	0,608	rc	0,058	żż	0,000
ćó	0,000	kj	0,000	rc	0,007	żż	0,000
cp	0,000	kk	0,002	rd	0,108	żx	0,000
cr	0,000	kl	0,041	re	0,222	żv	0,000
cs	0,000	kł	0,054	re	0,054	żq	0,000
ćś	0,000	km	0,001	rf	0,001	ža	0,078
ct	0,000	kn	0,039	rg	0,016	ža	0,006
cu	0,000	kń	0,000	rh	0,000	żb	0,005
cw	0,001	ko	0,724	ri	0,044	żc	0,012
cy	0,000	kó	0,053	rj	0,000	żć	0,000
cz	0,000	kp	0,001	rk	0,031	żd	0,034
ćż	0,000	kr	0,122	rl	0,005	że	0,704
cz	0,000	ks	0,053	rł	0,008	żę	0,007
cx	0,000	kś	0,000	rm	0,039	żf	0,000
cv	0,000	kt	0,292	rn	0,037	żg	0,000
cq	0,000	ku	0,265	rń	0,000	żh	0,000
da	0,379	kw	0,014	ro	0,824	ži	0,000
da	0,030	ky	0,001	ró	0,156	żj	0,000
db	0,010	kz	0,000	rp	0,007	żk	0,020
dc	0,024	kż	0,000	rr	0,002	żl	0,016
dć	0,000	kż	0,013	rs	0,049	żł	0,000

Załącznik nr 1 cd.

Bigram	Częstość występowania [%]	Bigram	Częstość występowania [%]	Bigram	Częstość występowania [%]	Bigram	Częstość występowania [%]
dd	0,015	kx	0,000	rś	0,002	zm	0,000
de	0,147	kv	0,000	rt	0,074	zn	0,067
dę	0,103	kq	0,000	ru	0,120	żń	0,000
df	0,000	la	0,368	rw	0,087	zo	0,044
dg	0,002	lq	0,040	ry	0,214	zó	0,001
dh	0,001	lb	0,030	rz	1,092	żp	0,000
di	0,022	lc	0,017	rż	0,000	żr	0,000
dj	0,012	łc	0,000	rż	0,005	żs	0,007
dk	0,076	ld	0,004	rx	0,000	żś	0,000
dl	0,162	le	0,632	rv	0,000	żt	0,000
dł	0,067	lę	0,047	rq	0,000	żu	0,006
dm	0,008	lf	0,001	sa	0,163	żw	0,000
dn	0,210	lg	0,002	są	0,090	ży	0,134
dń	0,000	lh	0,000	sb	0,001	żz	0,000
do	0,824	li	0,478	sc	0,076	żż	0,000
dó	0,014	lj	0,000	śc	0,000	żż	0,000
dp	0,023	lk	0,167	sd	0,000	żx	0,000
dr	0,104	ll	0,009	se	0,083	żv	0,000
ds	0,024	łł	0,000	sę	0,011	żq	0,000
dś	0,000	lm	0,011	sf	0,003	xa	0,000
dt	0,003	ln	0,094	sg	0,000	xą	0,000
du	0,098	łń	0,000	sh	0,002	xb	0,000
dw	0,060	lo	0,079	si	1,020	xc	0,000
dy	0,289	łó	0,002	sj	0,017	xć	0,000
dz	1,225	lp	0,001	sk	0,242	xd	0,000
dż	0,088	lr	0,000	sl	0,002	xe	0,000
dż	0,006	ls	0,025	sł	0,143	xę	0,000
dx	0,000	łś	0,000	sm	0,008	xf	0,000
dv	0,000	lt	0,006	sn	0,040	xg	0,000
dq	0,000	lu	0,154	sń	0,000	xh	0,000

Załącznik nr 1 cd.

Bigram	Częstość występowania [%]	Bigram	Częstość występowania [%]	Bigram	Częstość występowania [%]	Bigram	Częstość występowania [%]
ea	0,013	lw	0,016	so	0,137	xi	0,001
ea	0,000	ly	0,000	só	0,033	xj	0,000
eb	0,219	lz	0,000	sp	0,262	xk	0,000
ec	0,360	lż	0,000	sr	0,001	xl	0,000
éc	0,095	lż	0,001	ss	0,003	xł	0,000
ed	0,493	lx	0,000	sś	0,000	xm	0,000
ee	0,005	lv	0,000	st	1,448	xn	0,000
eę	0,000	lq	0,000	su	0,069	xń	0,000
ef	0,028	ła	0,479	sw	0,071	xo	0,000
eg	0,564	ła	0,030	sy	0,081	xó	0,000
eh	0,001	lb	0,038	sz	1,411	xp	0,000
ei	0,006	lc	0,004	sż	0,000	xr	0,000
ej	0,628	łc	0,000	sż	0,000	xs	0,000
ek	0,277	ld	0,002	sx	0,000	xś	0,000
el	0,219	le	0,294	sv	0,000	xt	0,000
eł	0,032	łę	0,009	sq	0,000	xu	0,000
em	0,814	lf	0,000	śa	0,000	xw	0,000
en	0,442	lg	0,001	śa	0,000	xy	0,000
eń	0,053	lh	0,000	śb	0,000	xz	0,000
eo	0,010	li	0,000	śc	0,188	xż	0,000
eó	0,000	lj	0,000	śc	0,148	xż	0,000
ep	0,134	lk	0,033	śd	0,000	xx	0,000
er	0,470	ll	0,000	śe	0,000	xv	0,000
es	1,053	ll	0,000	śę	0,000	xq	0,000
eś	0,376	lm	0,003	śf	0,000	va	0,002
et	0,154	ln	0,026	śg	0,000	vą	0,000
eu	0,014	ln	0,000	śh	0,000	vb	0,000
ew	0,172	ło	0,393	śi	0,000	vc	0,000
ey	0,002	łó	0,025	śj	0,000	vć	0,000
ez	0,176	lp	0,002	śk	0,001	vd	0,000

Załącznik nr 1 cd.

Bigram	Częstość występowania [%]	Bigram	Częstość występowania [%]	Bigram	Częstość występowania [%]	Bigram	Częstość występowania [%]
eż	0,034	lr	0,000	śl	0,201	ve	0,002
eż	0,114	ls	0,001	śl	0,000	vę	0,000
ex	0,001	łs	0,000	śm	0,109	vf	0,000
ev	0,001	łt	0,004	śn	0,067	vg	0,000
eq	0,000	łu	0,120	śń	0,000	vh	0,000
ęa	0,000	łw	0,000	śo	0,000	vi	0,005
ęa	0,000	ły	0,162	śó	0,000	vj	0,000
ęb	0,010	łz	0,001	śp	0,006	vk	0,000
ęc	0,154	łż	0,000	śr	0,025	vl	0,000
ęc	0,014	łż	0,003	śs	0,000	vł	0,000
ęd	0,199	łx	0,000	śś	0,000	vm	0,000
ęe	0,000	łv	0,000	śt	0,000	vn	0,000
ęę	0,000	łq	0,000	śu	0,000	vń	0,000
ęf	0,000	ma	0,606	św	0,074	vo	0,001
ęg	0,009	mą	0,010	śy	0,000	vó	0,000
ęh	0,000	mb	0,008	śz	0,000	vp	0,000
ęi	0,000	mc	0,004	śż	0,000	vr	0,000
ěj	0,000	mć	0,000	śż	0,000	vs	0,000
ęk	0,110	md	0,001	śx	0,000	vś	0,000
ęl	0,005	me	0,081	śv	0,000	vt	0,000
ęł	0,015	mę	0,027	śq	0,000	vu	0,000
ęm	0,000	mf	0,001	ta	1,114	vw	0,000
ęn	0,000	mg	0,000	tą	0,049	vy	0,000
ęń	0,000	mh	0,000	tb	0,000	vz	0,000
ęo	0,000	mi	0,798	tc	0,007	vź	0,000
ęó	0,000	mj	0,000	tć	0,000	vż	0,000
ęp	0,027	mk	0,021	td	0,000	vx	0,000
er	0,000	ml	0,004	te	0,826	vv	0,000
ęs	0,012	mł	0,012	tę	0,068	vq	0,000
ęś	0,026	mm	0,001	tf	0,001	qa	0,000

Załącznik nr 1 cd.

Bigram	Częstość występowania [%]	Bigram	Częstość występowania [%]	Bigram	Częstość występowania [%]	Bigram	Częstość występowania [%]
et	0,053	mn	0,252	tg	0,000	qa	0,000
eu	0,000	mń	0,000	th	0,002	qb	0,000
ew	0,000	mo	0,588	ti	0,010	qc	0,000
ey	0,000	mó	0,207	tj	0,000	qć	0,000
ez	0,010	mp	0,021	tk	0,190	qd	0,000
ėż	0,001	mr	0,009	tl	0,004	qe	0,000
ėź	0,028	ms	0,006	tł	0,015	qę	0,000
ex	0,000	mś	0,011	tm	0,002	qf	0,000
ev	0,000	mt	0,009	tn	0,088	qg	0,000
eq	0,000	mu	0,302	tń	0,000	qh	0,000
fa	0,049	mw	0,000	to	1,126	qi	0,000
fą	0,000	my	0,463	tó	0,170	qj	0,000
fb	0,000	mz	0,000	tp	0,005	qk	0,000
fc	0,000	mź	0,000	tr	0,382	ql	0,000
fć	0,000	mż	0,000	ts	0,002	qł	0,000
fd	0,000	mx	0,000	tś	0,000	qm	0,000
fe	0,016	mv	0,000	tt	0,002	qn	0,000
fę	0,000	mq	0,000	tu	0,266	qń	0,000
ff	0,001	na	1,427	tw	0,225	qo	0,000
fg	0,000	ną	0,102	ty	0,557	qó	0,000
fh	0,000	nb	0,001	tz	0,002	qp	0,000
fi	0,062	nc	0,030	tź	0,000	qr	0,000
fj	0,000	nć	0,000	tż	0,000	qs	0,000
fk	0,000	nd	0,037	tx	0,000	qś	0,000
fl	0,004	ne	0,333	tv	0,000	qt	0,000
fl	0,000	nę	0,046	tq	0,000	qu	0,001
fm	0,000	nf	0,014	ua	0,013	qw	0,000
fn	0,003	ng	0,011	uą	0,000	qy	0,000
fń	0,000	nh	0,000	ub	0,064	qz	0,000
fo	0,038	ni	2,955	uc	0,119	qż	0,000

Załącznik nr 1 cd.

Bigram	Częstość występowania [%]	Bigram	Częstość występowania [%]	Bigram	Częstość występowania [%]	Bigram	Częstość występowania [%]
fó	0,000	nj	0,000	uc	0,005	qz	0,000
fp	0,000	nk	0,073	ud	0,131	qx	0,000
fr	0,011	nl	0,000	ue	0,002	qv	0,000
fs	0,000	nł	0,000	uę	0,000	qq	0,000
fś	0,000	nm	0,000	uf	0,009		
ft	0,001	nn	0,101	ug	0,056		
fu	0,009	nń	0,000	uh	0,000		

Literatura

- abKey. 2004. abKey. Dostęp: 15 października 2014. Źródło: <http://abkey.com/>.
- Amuseum. 2008. Balanced keyboard layouts and comparisons. Dostęp: 15 października 2014. Źródło: <http://shenafu.com/layout.php>.
- Armel Gerald. 1999. Keyboard arrangement. United States, US005879089, 9 March 1999.
- Behrens Hanno. 2005. „NEO“ – ergonomisches Layout auf einer Standard-Tastatur. Dostęp: 15 października 2014. Źródło: <http://pebbles.schattenlauf.de/layout.php>.
- BÉPO. 2004. Disposition de clavier francophone et ergonomique bépo. Dostęp: 15 października 2014. Źródło: <http://bepo.fr/>.
- Bernath Colman. 1993. Alphabetic keyboard arrangement for typing Mandarin Chinese phonetic data, United States, US005212638, 18 May 1993.
- Bi Xiaojun, Smith Barton A., Zhai Shumin. 2010. Quasi-Qwerty soft keyboard optimization. W: CHI 2010. We are HCI. Conference proceedings and extended abstracts. The 28th Annual CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, april 10–15, 2010 in Atlanta, GA, USA. ACM, New York. s. 283–286. Źródło: <https://www3.cs.stonybrook.edu/~xiaojun/pdf/softkeyboard.pdf>.
- Blickensderfer George. 1899. Type-writing machine. United States, US 621742 A, 21 March 1899.
- Bonet Blai, Geffner Héctor. 2001. Planning as heuristic search. Artificial Intelligence, 129(1–2), s. 5–33.
- Brower Raymond. 1937. Keyboard for typewriters. United States, US002080457, 18 May 1937.
- Browne Paul. 2013. Pseudo-symmetrical ergonomic computer keyboard. United Kingdom, GB2500621, 2 October 2013.
- Brüntjen Steffen. 2008. EurKEY – The European keyboard layout. Dostęp: 15 października 2014. Źródło: <https://eurkey.steffen.bruentjen.eu/>.
- Capewell Michael. 2005. Alternative keyboard layouts. Dostęp: 15 października 2014. Źródło: http://www.michaelcapewell.com/projects/keyboard/layout_capewell.htm.
- CarpalxQ Keyboard Layout. 2007. CarpalxQ keyboard layout. Dostęp: 15 października 2017. Źródło: <http://jumpedthesynapse.blogspot.com/2007/07/carpalxq.html>.

- Choate John. 1996. Keyboard arrangement to maximize typing speed and ease of transition from a QWERTY keyboard. United States, US005498088, 12 March 1996.
- Coleman Shai. 2006. Colemak keyboard layout: ergonomic, fast and easy to learn QWERTY/Dvorak alternative. Dostęp: 15 października 2014. Źródło: <http://colemak.com/>.
- Crampton John. 2005. Electronic keyboard layout. World Intellectual Property Organization, WO2005026931, 24 March 2005.
- Dasgupta Tirthankar, Basu Anupam, Das Animesh, Mandal Promathesh. 2010. Design and evaluation of Bangla keyboard layouts. 2010 IEEE Students' Technology Symposium (TechSym), s. 248–254.
- Decreto-Lei. 1937. n.º 27:868. Diário do Governo, I série, número 165. Źródło: <https://files.dre.pt/1s/1937/07/16500/06910692.pdf>.
- Deshwal Priyendra S., Deb Kalyanmoy. 2003. Design of an optimal Hindi keyboard for convenient and efficient use. Źródło: <https://www.egr.msu.edu/~kdeb/papers/k2003004.pdf>.
- Dhakal Vivek, Feit Anna Maria, Kristensson Per Ola, Oulasvirta Antti. 2018. Observations on typing from 136 million keystrokes. W: CHI 2018. Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, April 21–26, 2018, Montreal, QC, Canada. ACM, New York. s. 1–12. Źródło: <https://userinterfaces.aalto.fi/136Mkeystrokes/resources/chi-18-analysis.pdf>.
- Dickens Michael. 2007. Keyboards | Mathematical Multicore. Dostęp: 15 października 2014. Źródło: <http://mathematicalmulticore.wordpress.com/category/keyboards/>.
- Dickens Michael. 2008. Keyboard layout. Dostęp: 15 października 2014. Źródło: <http://mtgap.bilfo.com/keyboard.html>.
- Dumez Hugues. 2011. BvoFRak. Dostęp: 15 października 2014. Źródło: <http://bvofrak.blogspot.com/>.
- Dvorak August, Dealey Wiliam. 1936. Typewriter keyboard. United States, US2040248, 12 May 1936.
- Eggers Jan, Feillet Dominique, Kehl Steffen, Wagner Marc Oliver, Yannou Bernard. 2003. Optimization of the keyboard arrangement problem using an ant colony algorithm. European Journal of Operational Research, 148(3), s. 672–686.
- Einbinder Harvey. 1975. Input keyboards. United States, US3929216 A, 30 December 1975.
- Einbinder Harvey. 1976. Orthogonal input keyboards. United States, US 3945482 A, 23 March 1976.
- Einbinder Harvey. 1982. Ten-finger typewriter keyboards. United States, US004332493, 1 June 1982.
- English keyboard. 1974. English keyboard scheme. United States, US003847263, 12 November 1974.

- Fagarasanu Mircea, Kumar Shrawan, Narayan Yogesh. 2005. The training effect on typing on two alternative keyboards. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 35(6), s. 509–516.
- Feit Anna M., Weir Daryl, Oulasvirta Antti. 2016. How we type: Movement strategies and performance in everyday typing. W: CHI 2016. Proceedings. The 34th Annual CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. San Jose Convention Center, San Jose, CA, May 7–12. Association for Computing Machinery, New York, s. 4262–4273. Źródło: <http://darylweir.com/assets/howwetype.pdf>.
- Gardner Kathleen. 1985. Typewriter keyboard layout. United States, US4519721 A, 28 May 1985.
- Gardey Delphine. 1998. La standardisation d'une pratique technique: la dactylographie (1883–1930). *Réseaux*, 1(87), s. 75–103.
- Giletech. 2005. Typing Tutor – Typing Test – Typing Game. Dostęp: 15 października 2014. Źródło: http://www.touch-typing-tutor.com/TypingQueen-Doc/ReadMe_EN.htm.
- Goebel Hartmut. 2000. De-ergo – Forschung bei Goebel Consult. Dostęp: 15 października 2014. Źródło: <http://forschung.goebel-consult.de/de-ergo/>.
- Goettl Jeffrey S., Brug Alexander W., Julstrom Bryant A. 2005. Call me e-mail: arranging the keyboard with a permutation-coded genetic algorithm. W: Haddad Hisham M. (ed.). Proceedings of the 2005 ACM symposium on Applied computing. ACM, New York, s. 947–951. Źródło: <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/1066677.1066894>.
- Hallingstad Híkon. 2001. The Arensito Keyboard Layout. Dostęp: 14 lutego 2023. Źródło: <http://www.pvv.org/~hakonhal/main.cgi/keyboard>.
- Hiraga Yuzuru, Ono Yoshihiko, Hisao Yamada. 1980. An analysis of the standard English keyboard. W: Coling 80. Proceedings of the 8. International Conference on Computational Linguistics, Tokyo, Sept. 30 – Oct. 4, 1980. s. 242–248. Źródło: <https://aclanthology.org/C80-1036.pdf>.
- Mathematical Multicore. 2014. The keyboard layout project. Dostęp: 15 października 2014. Źródło: <http://mathematicalmulticore.wordpress.com/the-keyboard-layout-project/>.
- Hoke Roy. 1924. Typewriter keyboard arrangement. United States, US001506426, 26 August 1924.
- Howard Martin. 2014. Antique typewriters. Dostęp: 15 października 2014. Źródło: <http://antiquetypewriters.com/index.htm>.
- Hughes Dominic, Warren James, Buyukkokten Orkut. 2002. Empirical bi-action tables: A tool for the evaluation and optimization of text-input systems. Application I: Stylus keyboards. *Human–Computer Interaction*, 17(2–3), s. 271–309.
- iKare. 2015. ICQCU. Dostęp: 15 września 2015. Źródło: <http://www.icqcu.com/>.

- ISO/IEC 9995-2:2009. Information technology – Keyboard layouts for text and office systems – Part 2: Alphanumeric section.
- Karat Clare-Marie, Halverson Christine, Horn Daniel, Karat John. 1999. Patterns of entry and correction in large vocabulary continuous speech recognition systems. W: Williams Marian G., Altom Mark W. (eds.). CHI '99. Human factors in computing systems. The CHI is the limit. CHI 99 conference proceedings. Association for Computing Machinery, New York. s. 568–575. Źródło: <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/302979.303160>.
- Klausler Peter. 2002. Dostęp: 15 października 2014. Źródło: http://www.redditmirror.cc/cache/websites/klausler.com_7ql33/klausler.com/evolved.html.
- Korpus IPI PAN. 2006. Korpus Języka Polskiego IPI PAN. Dostęp: 15 października 2014. Źródło: <http://korpus.pl/index.php?page=download>.
- Krzywinski Martin. 2005. Carpalx – keyboard layout optimizer. Dostęp: 15 października 2014. Źródło: <http://mkweb.bcgsc.ca/carpalx/>.
- Leboutte Francis. 2002. Clavier Dvorak-fr : La disposition et ses variants. Dostęp: 15 października 2014. Źródło: <http://www.algo.be/ergo/dispositions.htm>.
- Lee Paul Ung-Joon, Zhai Shumin. 2004. Top-down learning strategies: can they facilitate stylus keyboard learning?. *International Journal of Human-Computer Studies*, 60(5–6), s. 585–598.
- Lesh Gregory W., Moulton Bryan J., Higginbotham D. Jeffery. 1998. Optimal character arrangements for ambiguous keyboards. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, 6(4), s. 415–423.
- Li Yanzhi, Lijuan Chen, Goonetilleke Ravindra S. 2006. A heuristic-based approach to optimize keyboard design for single-finger keying applications. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 36(8), s. 695–704.
- Light Lissa W., Anderson Peter G. 1993. Typewriter keyboards via simulated annealing. *AI Expert*, September.
- Lilley Ted. 2012. Minimак – Home, Dostęp: 15 października 2014. Źródło: <http://www.minimak.org/>.
- Liveauctioneers.com. Dostęp: 30 stycznia 2023. Źródło: https://p1.liveauctioneers.com/364/8196/1413799_2_1.jpg.
- Łebkowski Piotr, Puka Radosław. 2013. QWERTY keyboard and the Polish language – study of the layout adaptation. W: Iwaszczuk Natalia (ed.). *Selected Economic and Technological Aspects of Management*. AGH University of Science and Technology Press, Krakow, s. 167–178.
- Malt Lillian. 1981. Keyboard arrangement. United States, US004244659, 13 January 1981.
- Marsan Claude. 1988. Claviers alphanumeriques ergonomiques pour machines a ecrire et similaires. République Française, FR2611589, 9 September 1988.

- McGunnigle Roger. 1986. Multiple format keyboard. United States, US004613247, 23 September 1986.
- Messenger Robert. 2014. ozTypewriter – The world of typewriters. Australian typewriter Museum, Canberra. Dostęp: 15 października 2014. Źródło: <http://oztypewriter.blogspot.com/2011/07/on-this-day-in-typewriter-history-liii.html>.
- Mickiewicz Adam. 2003. Pan Tadeusz. Oprac. Włodarczyk Barbara, Wydawnictwo Greg, Kraków.
- Microsoft. 2007. Microsoft Keyboard Layout Creator (MSKLC) Version 1.4. Dostęp: 28 lutego 2023. Źródło: <https://www.microsoft.com/en-us/download/details.aspx?id=102134>.
- Microsoft. 2014. Windows keyboard layouts. Dostęp: 15 października 2014. Źródło: <http://msdn.microsoft.com/pl-pl/goglobal/bb964651>.
- Milton Richard. 2004. Portable typewriter Blickensderfer. Dostęp: 15 października 2014. Źródło: http://www.portabletypewriters.co.uk/portable_typewriters_blickensderfer.htm.
- NAHLIK SOFT. 2014. Mistrz Klawiatury II. Źródło: <http://www.nahliksoft.com.pl/phtml/p-mk2.html>.
- Neo-Layout. 2004. Hardwareentwicklung – Neo-Layout. Dostęp: 15 października 2014. Źródło: <http://wiki.neo-layout.org/wiki/Hardwareentwicklung>.
- Neo-Layout. 2014. Neo – Ergonomisches Tastaturlayout. Dostęp: 15 października 2014. Źródło: <http://neo-layout.org/>.
- Nicolson Roerick I., Gardner Peter H. 1985. The QWERTY keyboard hampers school-children. *British Journal of Psychology*, 76(4), s. 525–531.
- Nivasch Keren, Azaria Amos. 2021. A deep genetic method for keyboard layout optimization. 2021 IEEE 33rd International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI). s. 435–441.
- Norman David. 2014. Norman layout. 46% less effort than QWERTY. Dostęp: 15 października 2014. Źródło: <https://normanlayout.info/>.
- Norman Donald A., Fisher Diane. 1982. Why alphabetic keyboards are not easy to use: Keyboard layout doesn't much matter. *Human Factors*, 24(5), s. 509–519.
- Onsorodi Amir Hosein Habibi, Korhan Orhan. 2020. Application of a genetic algorithm to the keyboard layout problem. *PLOS ONE*, 15(1), e0226611.
- Parkinson John. 2000. User-friendly and efficient keyboard. United States, US 6053647 A, 25 April 2000.
- PCD Maltron. 1988. A keyboard to increase productivity and reduce postural stress. Paper presented at The Annual International Industrial Ergonomics and Safety Conference, 8–10 June 1988, New Orleans. Dostęp: 15 października 2014. Źródło: <http://www.maltron.com/keyboard-info/academic-papers/234-a-keyboard-to-increase-productivity-and-reduce-postural-stress>.

- Pieppgrass David. 2006. Qwerty, Dvorak and the Asset keyboard. Dostęp: 15 października 2014. Źródło: <http://millikeys.sourceforge.net/asset/>.
- Pradeepmon T.G., Panicker Vinay V., Sridharan Rajagopalan. 2018. Hybrid estimation of distribution algorithms for solving a keyboard layout problem. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 35(6), s. 352–367.
- Puka Radosław. 2014. Przegląd klawiatur dedykowanych dla języków opartych na alfabecie łacińskim. W: Łebkowski Piotr (red.). *Zarządzanie przedsiębiorstwem. Teoria i praktyka 2014* [CD-ROM]. Wydawnictwa AGH, Kraków, s. 151–171.
- Puka Radosław, Łebkowski Piotr. 2015. Problem optymalizacji układu klawiatury komputerowej. *Technologia i Automatyzacja Montażu*, 2, s. 33–37.
- Puka Radosław, Łebkowski Piotr. 2016. Problem identyfikacji parametrów modelu optymalizacji rozmieszczenia znaków na klawiaturze komputera. W: Knosala Ryszard (red.). *Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji*, t. 2. Oficyna Wydawnicza Polskiego Zarządzania Produkcją, Opole, s. 130–140.
- Puka Radosław, Łebkowski Piotr, Duda Jerzy. 2021. One row keyboard: the concept of designing a common layout for physical and virtual keyboards. *Electronics*, 10(6), s. 663.
- Quinn Jameson. 2013. qwpr keylayout and layout translator. Dostęp: 15 października 2014. Źródło: <http://sourceforge.net/projects/qwpr/>.
- Rakhmetulla Gulnar, Arif Ahmed Sabbir. 2020. Senorita: A chorded keyboard for sighted, low vision, and blind mobile users. W: CHI'20. Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. April 25–30, 2020, Honolulu, HI, USA. Association for Computing Machinery, New York, s. 1–13. Źródło: https://www.asarif.com/pub/Rakhmetulla_CHI2020_Senorita.pdf.
- Rick Jochen. 2010. Performance optimizations of virtual keyboards for stroke-based text entry on a touch-based tabletop. W: Proceedings of the 23rd annual ACM symposium on User interface software and technology, ACM, New York, s. 77–86. Źródło: <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/1866029.1866043>.
- Robiński Arkadiusz. 2007. Polski międzynarodowy. Dostęp: 15 października 2014. Źródło: <http://robinski.org/polski-miedzynarodowy/>.
- Romberg Harvey. 1991. Key arrangement and method of inputting information from a key arrangement. United States, US5003301, 26 March 1991.
- Rowell Sidney. 1909. Typewriter keyboard. United States, US000943466, 14 December 1909.
- San Ho Mun. 2005. Keyboard layout. United States, US6900794 B1, 31 May 2005.
- Sawik Tadeusz. 1998. *Badania operacyjne dla inżynierów zarządzania*. Wydawnictwa AGH, Kraków.
- Sholes Christopher Latham. 1873. *Ilion Milwaukee Daily Sentinel*, 30(142), s. 2.

- Sholes Christopher Latham. 1896. Type-writing machine. United States, US568630, 29 September 1896.
- Słownik sjp.pl. 2014. Lista słów do gier – Słownik SJP. Dostęp: 15 października 2014. Źródło: <http://sjp.pl/sownik/growy/>.
- Słownik frekwencyjny. 2010. Nowa edycja wzbogaconego korpusu słownika frekwencyjnego. Dostęp: 15 października 2014. Źródło: <http://www.mimuw.edu.pl/pol-szczyzna/pl196x/wzbogacony/index.htm>.
- Smith Barton A., Zhai Shumin. 2001. Optimised virtual keyboards with and without alphabetical ordering – a novice user study. W: Hirose Michitaka (ed.). Human-Computer Interaction. INTERACT '01: IFIP TC13 International Conference on Human-Computer Interaction, Tokyo, Japan, July 9–13, 2001. IOS Press, s. 92–99. Źródło: https://www.researchgate.net/profile/Barton-Smith-2/publication/2363343_Optimised_Virtual_Keyboards_with_and_without_Alphabetical_Ordering_-_A_Novice_User_Study/links/0fcfd506f2ec9984be000000/Optimised-Virtual-Keyboards-with-and-without-Alphabetical-Ordering-A-Novice-User-Study.pdf.
- Sörensen Kenneth. 2007. Multi-objective optimization of mobile phone keymaps for typing messages using a word list. *European Journal of Operational Research*, 179(3), s. 838–846.
- Sörensen Kenneth, Glover Fred. 2013. Metaheuristics. W: Gass Saul I., Fu Michael C. (eds.). *Encyclopedia of Operations Research and Management Science*, Springer New York, NY, s. 960–970.
- Statistica. 2011. Internetowy podręcznik statystyki. Dostęp: 15 października 2017. Źródło: <https://www.statsoft.pl/textbook/stathome.html>.
- Stegemann Ulf. 2001. Dvorak Tastaturlayout. Dostęp: 15 października 2014. Źródło: <http://ulf.zeitform.de/en/documents/dvorak>.
- Stoye Nils Peter, Rieger Torsten, Menzel Justus. 2005. RISTOME – Die Revolution der Tastatur. Dostęp: 15 października 2014. Źródło: <http://www.ristome.de/>.
- Szeffel T. 1951. Zagadnienia normalizacji w maszynach do pisanie. *Wiadomości PKN*, XIX(5), s. 321–329.
- Tolkien John Ronald Reuel. 2012. *Władca Pierścieni*. Przeł. Derdziński Ryszard, Skibniewska Maria, Warszawskie Wydawnictwo Literackie MUZA, Warszawa.
- Trojanowski Krzysztof. 2005. *Metaheurystyki praktyczne*. Wydawnictwo WIT, Warszawa.
- Trotman Douglas. 2005. Keyboard arrangement for easy acquisition of typing skills. United States, US006932525, 23 August 2005.
- Typewriter Museum. 2001. The virtual typewriter museum. Dostęp: 15 października 2014. Źródło: <http://www.typewritermuseum.org/>.
- Udosen U.J. 2009. Evaluation and improvement of Dvorak keyboard layout using CAD-WORK. *Advanced Materials Research*, 62–64, s. 585–591.

- Wagner Marc Oliver, Yannou Bernard, Kehl Steffen, Feillet Dominique, Eggers Jan. 2003. Ergonomic modelling and optimization of the keyboard arrangement with an ant colony algorithm. *Journal of Engineering Design*, 14(2), s. 187–208.
- Wedding Rike Maria. 2006. Faster, practical keyboard. United States, US7137749 B2, 21 November 2006.
- Wiktionary. 2014. Wiktionary: Frequency lists/Polish wordlist. Dostęp: 15 października 2014. Źródło: https://en.wiktionary.org/wiki/Wiktionary:Frequency_lists/Polish_wordlist.
- Wilcox Rand R. 2010. *Fundamentals of Modern Statistical Methods. Substantially Improving Power and Accuracy*. Second ed. Springer New York, NY.
- Wobbrock Jacob O., Myers Brad A. 2006. Analyzing the input stream for character-level errors in unconstrained text entry evaluations. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)*, 13(4), s. 458–489.
- Woods Debra. 2005. User friendly keyboard. United States, US006965372, 15 November 2005.
- XPeRT. 2003. XPeRT Keyboarding alternative – reach touch typing speed without training using the XPeRT keyboard. Dostęp: 15 października 2013. Źródło: <http://www.xpertkeyboard.com/>.
- Yasuoka Koichi, Yasuoka Motoko. 2011. On the prehistory of QWERTY. *ZINBUN*, 42, s. 161–174.
- Yener Ýhsan. 2014. Intersteno-Türk. Dostęp: 15 października 2014. Źródło: <http://www.interstenoturk.com/fklavyehikayesi02.html>.
- Yin Peng-Yeng, Su En-Ping. 2011. Cyber Swarm optimization for general keyboard arrangement problem. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 41(1), s. 43–52.
- Zhai Shumin, Hunter Michael, Smith Barton. 2002. Performance optimization of virtual keyboards. *Human-Computer Interaction*, 17(2–3), s. 229–269.
- Zubrzycka Ludomiła. 1963. O dostosowywaniu klawiatury maszyny do pisania do struktury języka. *Zastosowania Matematyki*, 6, s. 419–439.



ISBN 978-83-67427-36-4



9 788367 427364