

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
w Warszawie
Wydział Zastosowań Informatyki i Matematyki

Mateusz Tracz
172391

Implementacja serwisu umożliwiającego dwuetapową weryfikację użytkownika

Implementation of two factor authentication service
at the Warsaw University of Life Sciences – SGGW

Praca dyplomowa inżynierska
na kierunku Informatyka

Praca wykonana pod kierunkiem
dr. hab. Alexandera Prokopenya, prof. SGGW
Wydział Zastosowań Informatyki i Matematyki
Katedra Zastosowań Informatyki
Zakład Modelowania i Analizy Systemów

Warszawa 2017

Oświadczenie promotora pracy

Oświadczam, że niniejsza praca została przygotowana pod moim kierunkiem i stwierdzam, że spełnia ona warunki do przedstawienia tej pracy w postępowaniu o nadanie tytułu zawodowego.

Data

Podpis promotora pracy

Oświadczenie autora pracy

Świadom odpowiedzialności prawnej, w tym odpowiedzialności karnej za złożenie fałszywego oświadczenia, oświadczam, że niniejsza praca dyplomowa została napisana przeze mnie samodzielnie i nie zawiera treści uzyskanych w sposób niezgodny z obowiązującymi przepisami prawa, w szczególności z ustawą z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (Dz. U. Nr 90 poz. 631 z późn. zm.)

Oświadczam, że przedstawiona praca nie była wcześniej podstawą żadnej procedury związanej z nadaniem dyplomu lub uzyskaniem tytułu zawodowego.

Oświadczam, że niniejsza wersja pracy jest identyczna z załączoną wersją elektroniczną. Przyjmuję do wiadomości, że praca dyplomowa poddana zostanie procedurze antyplagiatowej.

Data

Podpis autora pracy

Spis treści

1	Wstęp	9
1.1	Cel pracy	9
1.2	Pojęcie uwierzytelnienia wielopoziomowego	9
1.3	Korzyści płynące z używania uwierzytelnienia wielopoziomowego	9
2	Elementy kryptografii	10
2.1	Kryptografia symetryczna oraz asymetryczna	10
2.1.1	Szyfrowanie symetryczne	10
2.1.2	Szyfrowanie asymetryczne	10
2.2	Szyfry blokowe	11
2.2.1	Tryby pracy szyfrów blokowych	11
2.2.2	Data Encryption Standard	14
2.2.3	Advanced Encryption Standard	15
2.3	Szyfry strumieniowe	16
2.3.1	RC4	16
2.3.2	Salsa20	16
2.4	Kryptograficzna funkcja skrótu	17
2.4.1	Message Digest 5	17
2.4.2	Secure Hash Algorithm 1	18
2.4.3	Secure Hash Algorithm 2	20
2.4.4	Secure Hash Algorithm 3	22
2.5	Kod uwierzytelnienia wiadomości	23
2.6	MAC bazujący na funkcji skrótu	23
2.7	Pojęcia entropii	23
3	Kryptografia w praktyce	24
3.1	Pojęcia pomocnicze	24
3.1.1	Kodowanie transportowe	24
3.1.2	Czas uniksowy	25
3.1.3	Ujednolicony identyfikator zasobów	25
3.2	Hasło jednorazowe	26
3.3	Interfejs Windows Data Protection	26
4	Ataki na mechanizm OTP	27
4.1	Atak urodzinowy	27
4.2	Side-channel attacks	27
4.3	Atak przez powtórzenie	27
4.4	Atak „Man in the middle”	27

4.5	Phishing	27
5	PicnicAuth	28
5.1	Architektura projektu	28
5.2	Generowanie OTP po stronie użytkownika	28
5.3	Przechowywanie sekretu użytkownika	28
5.4	Przykład użycia projektu	28
5.5	Planowane ulepszenia	28
6	Zakończenie	29
6.1	Podsumowanie i wnioski	29
6.2	Podziękowania	29
7	Spis literatury	30

Streszczenie

TODO: POLSKI TYTUŁ

TODO: POLSKIE STRESZCZENIE

Słowa kluczowe – TODO: POLSKIE TAGI implementacja, SGGW, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego

Summary

TODO: ANGIELSKIE TYTUŁ

TODO: ANGIELSKIE STRESZCZENIE

Keywords – TODO: ANGIELSKIE TAGI thesis, implementation, SGGW, Warsaw University of Life Sciences

1 Wstęp

1.1 Cel pracy

1.2 Pojęcie uwierzytelnienia wielopoziomowego

1.3 Korzyści płynące z używania uwierzytelnienia wielopoziomowego

2 Elementy kryptografii

2.1 Kryptografia symetryczna oraz asymetryczna

Współczesną kryptografię można podzielić na kryptografię symetryczną oraz kryptografię asymetryczną. W dużym uproszczeniu, w przypadku kryptografii symetrycznej używany jest jeden, wspólny klucz kryptograficzny a w kryptografii asymetrycznej obecna jest para kluczy kryptograficznych - publiczny oraz prywatny. Przez co kryptografia asymetryczna często nazywana jest kryptografią klucza publicznego.

2.1.1 Szyfrowanie symetryczne

Szyfrowanie symetryczne przy użyciu klucza kryptograficznego „miesza” dane w taki sposób, że nie jest możliwe odzyskanie danych wejściowych bez użycia tego samego klucza. Algorytmy szyfrowania znacznie różnią się między sobą, jednak można pośród nich wyróżnić szyfry blokowe oraz szyfry strumieniowe.

Szyfry symetryczne idealnie nadają się do szyfrowania dużych ilości danych.

2.1.2 Szyfrowanie asymetryczne

Algorytmy używane w szyfrach asymetrycznych opierają się na rozwiązywaniu bardzo trudnych matematycznych problemów. Konstrukcja tych szyfrów pozwala niemal natychmiastowo rozwiązać zadany problem (i co za tym idzie odszyfrować dane) mając odpowiedni klucz, a w przypadku nieposiadania owego klucza, problem staje się niemożliwy do rozwiązania w rozsądnym czasie. Zwykle wykorzystywane jest tutaj zagadnienie faktoryzacji dużych liczb oraz znajdowania dyskretnych logarytmów.

Algorytmy asymetryczne działają na danych o ustalonej długości - zwykle od 1024 do 2048 bitów. Wykorzystywane są one zwykle tylko do przesłania klucza symetrycznego, który jest używany do szyfrowania pozostałej komunikacji. Spowodowane jest to tym, że algorytmy symetryczne są dużo bardziej wydajne niż asymetryczne.

Szyfrowanie asymetryczne poprawia nieco problem dystrybucji klucza. W odróżnieniu od szyfrowania symetrycznego, wymagane jest użycie $O(N)$ kluczy zamiast $O(N^2)$ kluczy.

Przykładami algorytmów asymetrycznych jest RSA lub ElGamal.

W praktyce rzadko kiedy korzysta się z wyłącznie kryptografii symetrycznej lub wyłącznie asymetrycznej. Zwykle w skład systemów kryptograficznych wchodzi elementy kryptografii symetrycznej jak również asymetrycznej.

2.2 Szyfry blokowe

Jednym z podstawowych elementów systemów kryptograficznych jest szyfr blokowy. Jest to algorytm operujący na bloku danych o ustalonej długości. Długość wynikowego bloku danych jest równa długości bloku podanego na wejściu.

Szyfry blokowe oparte są o tzw. „sieć substytucji-permutacji”. Oznacza to, że dla każdego możliwego bloku jest ustalany dokładnie jeden blok mu odpowiadający. Za pomocą klucza kryptograficznego determinowane jest, który blok odpowiada któremu.

Dla zobrazowania tej definicji poniżej znajduje się szyfr o długości bloku równej 4 bity:

Tabela 2.1. Przykładowy szyfr blokowy o 4-bitowym bloku

0000: 0010	1000: 1111
0001: 0000	1001: 0011
0010: 0110	1010: 1011
0011: 1101	1011: 0001
0100: 1110	1100: 1100
0101: 0101	1101: 1001
0110: 0100	1110: 0111
0111: 1000	1111: 1010

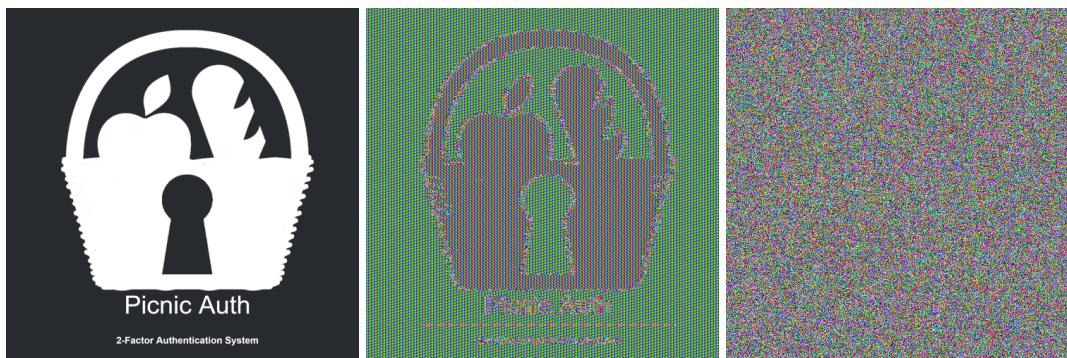
Niezwykle ważną cechą jaka wynika z powyższej charakterystyki szyfru blokowego jest fakt, że znając pewną liczbę par (wiadomość, zaszyfrowana wiadomość), nie ujawnia to żadnych informacji o innych parach, szyfrowanych tym samym kluczem. Jedyną możliwą formą odszyfrowania wiadomości, nie posiadając klucza, jest wtedy metoda siłowa czyli wypróbowanie wszystkich możliwych kombinacji. Biorąc pod uwagę powyższy przykład, mając 16 różnych bloków, liczba ich permutacji wynosi $16! = 20922789888000$. Prawdziwe szyfry posiadają znacznie większy rozmiar bloku, zwykle od 128 do 256 bitów. Przykładowo dla szyfru z rozmiarem bloku równym 128 bitów, należałoby sprawdzić aż $(2^{128})!$ możliwych kluczy.

2.2.1 Tryby pracy szyfrów blokowych

Nietrudno zauważyć jedną wadę szyfrów blokowych, która znacząco ogranicza proces szyfrowania. A mianowicie przy użyciu szyfrów blokowych, jesteśmy w stanie zaszyfrować dane o długości równej długości bloku. Zwykle chcielibyśmy jednak szyfrować wiadomości dłuższe niż 16 czy 32 bajty. Z tego powodu zostały stworzone uniwersalne konstrukcje, możliwe do użycia z dowolnym szyfrem blokowym, pozwalające zaszyfrować dane o dowolnej długości.

ECB

Rozwiązaniem przychodzącym natychmiast na myśl jest podzielenie wiadomości na bloki i zaszyfrowanie każdego bloku oddzielnie.



(a) Logo projektu.

(b) AES w trybie ECB.

(c) AES w trybie CBC.

Rysunek 2.1. Wizualizacja trybów szyfrowania.

Tryb ten nosi nazwę *ECB* (*elektroniczna książka kodowa*).

Posiada on niezwykle niebezpieczną wadę. Dany blok wiadomości zostanie zaszyfrowany do zawsze tego samego bloku szyfrogramu.

Przykładowo mając wiadomość:

$|ABCD|EFGH|ABCD|IJKL|$

oraz szyfr blokowy o długości bloku 4 bajty, zaszyfrowana wiadomość będzie wyglądać następująco:

$|IEKG|BKLD|IEKG|FHDL|$

Wadę tę można zobrazować szyfrując w trybie ECB dane dowolnej grafiki. Grafika po zaszyfrowaniu nie jest w pełni czytelna ale z pewnością można stwierdzić co na niej jest.

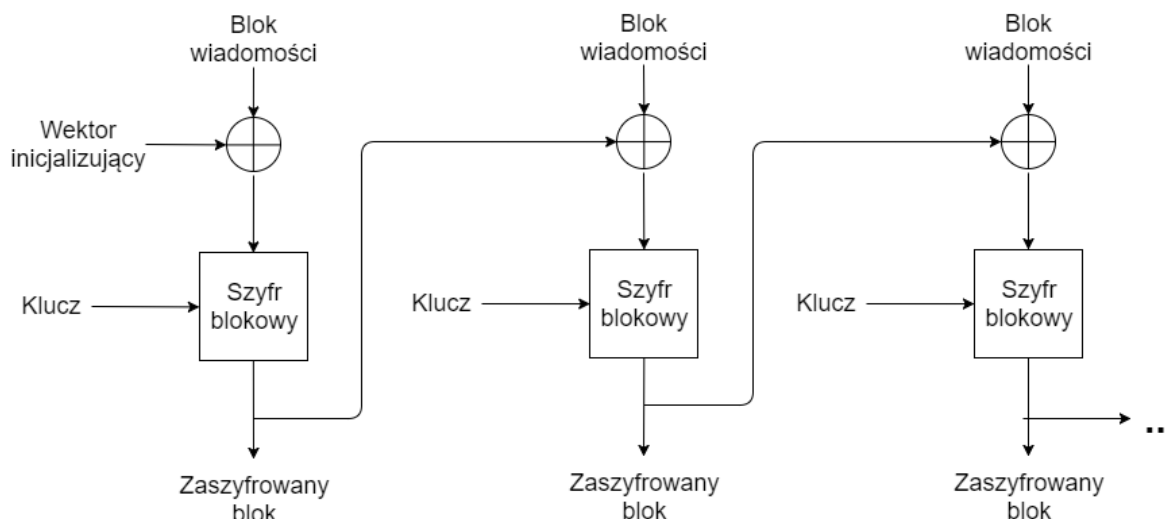
Tryb ECB podatny jest również na atak typu *oracle*.

CBC

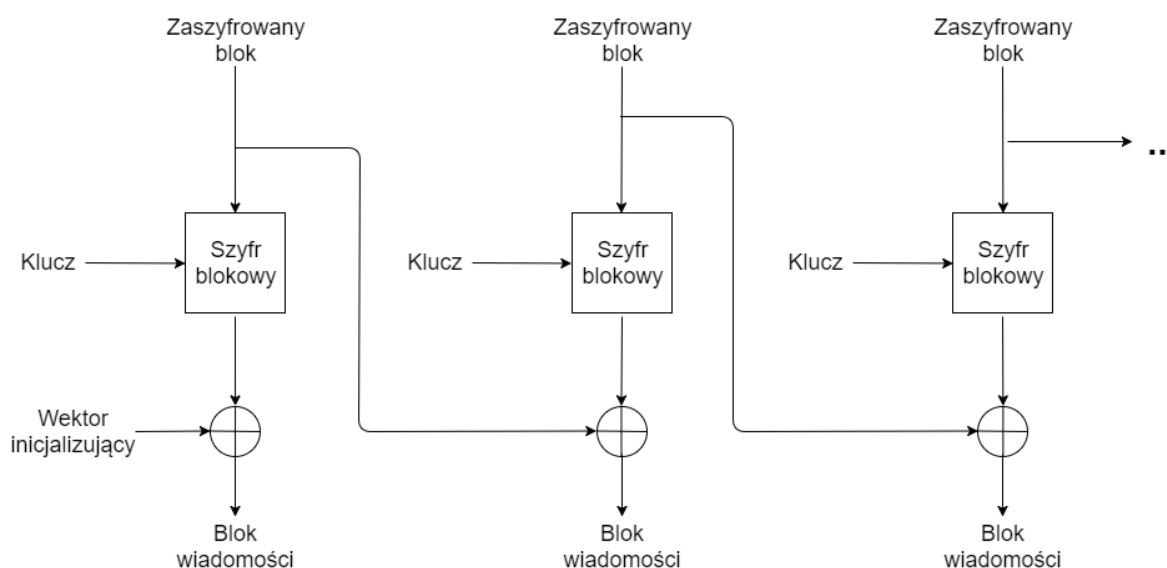
Najczęściej używanym trybem jest *CBC* - *Cipher Block Chaining* (*ang.*). W tym trybie, blok wiadomości najpierw jest XORowany z poprzednim zaszyfrowanym blokiem a następnie on sam jest poddawany procesowi szyfrowania. W przypadku pierwszego bloku, dla którego nie ma bloku poprzedniego, wprowadzane jest pojęcie *wektora inicjalizującego*.

Wektor ten powinien być niemożliwy do zgadnięcia a w idealnej sytuacji powinien on być kryptograficznie losowy. Nie jest konieczne, aby wektor inicjalizujący był tajny, zwykle jest wysyłany razem z zaszyfrowaną wiadomością. Ważne jest jednak, aby atakujący nie był w stanie go przewidzieć przed samym procesem szyfrowania.

Proces deszyfrowania jest analogiczny. W pierwszej kolejności, zaszyfrowany blok poddawany jest działaniu szyfru blokowego, po czym jest on XORowany z poprzednim zaszyfrowanym blokiem. Na pierwszy blok musi zostać użyta funkcja XOR z takim samym wektorem inicjalizującym, jaki został użyty podczas szyfrowania.



Rysunek 2.2. Schemat szyfrowania w trybie CBC.

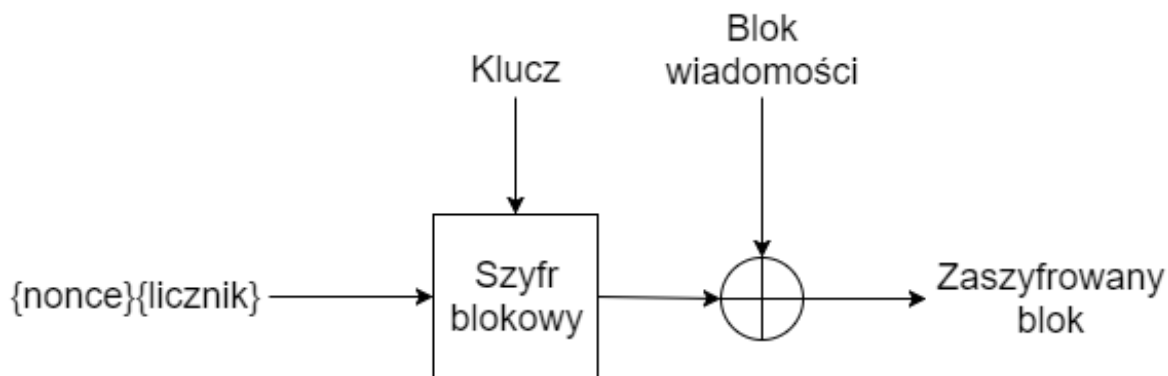


Rysunek 2.3. Schemat deszyfrowania w trybie CBC.

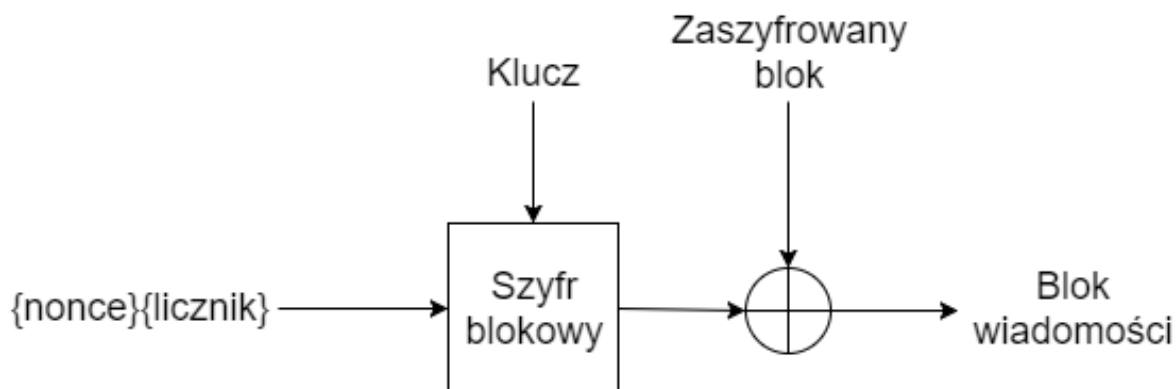
Tryb CBC sam w sobie można uznać za bezpieczny (w odróżnieniu od ECB), należy jednak o paru najczęściej popełnianych błędach:

1. Używanie tego samego wektora inicjalizującego dla paru wiadomości.
2. Używanie przewidywalnych wektorów inicjalizujących, na przykład bazujących na liczniku.
3. Używanie klucza jako wektora inicjalizującego.

Jednym z najbardziej znanych ataków na system bazujący na trybie CBC był atak o nazwie *BEAST* [13]. Błędem, który został wykorzystany, było użycie zaszyfrowanego bloku poprzedniej wysłanej wiadomości jako wektora inicjalizującego.



Rysunek 2.4. Schemat szyfrowania w trybie CTR.



Rysunek 2.5. Schemat deszyfrowania w trybie CTR.

CTR

Warto wspomnieć jeszcze o trybie *CTR* - *Counter* (ang.), gdyż sposób jego działania jest zbliżony do szyfrów strumieniowych. Wykorzystywany jest w nim *liczba używana jednорazowo* (z angielskiego „*nonce*”) oraz licznik. Licznik jest zwiększany dla każdego z bloków wiadomości. Na wejście szyfru blokowego podawana jest wyżej wymieniona liczba połączona z licznikiem. Następnie wynik działania szyfru jest XORowany z blokiem wiadomości. Krytyczne jest tutaj generowanie nowej liczby *nonce* dla każdej z wiadomości.

2.2.2 Data Encryption Standard

Szyfr blokowy DES był pierwszym algorytmem, zatwierdzonym przez *Narodowe Biuro Standaryzacji* (obecnie *Narodowy Instytut Standaryzacji i Technologii*), jako bezpieczny standard szyfrowania symetrycznego. Przez ponad 20 lat stowarzyszenia naukowe poddawały go intensywnym analizom.

W tym czasie został wielokrotnie złamany, głównie przez długość klucza jaką posiada szyfr - zaledwie 56 bitów.

Jednym ze skutecznych ataków na DES było przedsięwzięcie, dokonane w styczniu 1999 roku, składające się z kooperacji platformy *distributed.net* oraz urzřdzenia stworzonego przez *Electronic Frontier Foundation* o nazwie *Deep Crack*. Atak bazował wyłącznie na metodzie siłowej, więc należało sprawdzić $2^{56} = 72\,057\,594\,037\,927\,936$ różnych kluczy. W mniej

niż 24 godziny szyfr DES został sukcesywnie złamany. Przy dzisiejszej mocy obliczeniowej może on zostać złamany przez jedną maszynę w około jeden dzień [14].

Próba uratowania szyfru była propozycja algorytmu 3DES. Polegał on na zaszyfrowaniu danych szyfrem DES, odszyfrowaniu ich, a następnie ponownym zaszyfrowaniu. Zamiast 3-krotnego szyfrowania, 3DES został zaprojektowany sposób umożliwiający zachowanie kompatybilności z systemami, w których możliwe było użycie jedynie wersji podstawowej algorytmu.

Pomimo zwiększonej długości klucza w przypadku 3DES, w porównaniu do AES jest mniej bezpieczny i nadzwyczajnie wolny (AES potrzebuje 12.6 cykli procesora do zaszyfrowania bajtu danych, 3DES aż 134.5 [8]).

2.2.3 Advanced Encryption Standard

Po problemach z DES agencja NIST ogłosiła konkurs na algorytm, który mógłby stać się nowym standardem. Do konkursu zgłoszone zostały między innymi: *Rijndael*, *Serpent*, *Twofish*, *MARS* czy *RC6*. Zostały one poddane intensywnej kryptoanalizie. Ostatecznie wygrał algorytm stworzony przez Vincenta Rijmena oraz Joana Daemena - Rijndael. Rijndael jest rodziną szyfrów, których rozmiar bloku oraz rozmiar klucza może wynosić: 128, 160, 192, 224 i 256 bitów. Za standard (AES) uznany został Rijndael z długością bloku równą 128 bitów oraz rozmiarze klucza równym 128, 192 lub 256 bitów.

Algorytm składa się z wielu przebiegów. Każdy przebieg składa się z następujących kroków:

1. Rozszerzenie klucza.

Jako że, w każdym przebiegu potrzebny jest 128-bitowy klucz, zachodzi konieczność wygenerowania wielu kluczy, na podstawie głównego klucza.

W pierwszej kolejności główny klucz jest ładowany do macierzy 4 na 4 bajty. Ostatnia kolumna jest obracana (bajt z góry jest wstawiany na dół) a następnie wartość każdej komórki z obróconej kolumny podawana jest do nieliniowej funkcji zamiany, specyficznej dla algorytmu AES, zamieniającej podany bajt na inny. Następnie kolumna ta jest XORowana ze stałą przebiegu (inną dla każdego przebiegu). Na koniec XORowana jest ona z pierwszą kolumną z poprzedniego przebiegu.

Pozostałe kolumny liczone są XORując poprzednią kolumnę z kolumną na tym samym miejscu, ale z poprzedniego przebiegu.

2. Zamiana bajtów.

3. Zamiana wierszy.

4. Mieszanie kolumn.

Na chwilę obecną nie są znane żadne praktyczne ataki na AES a co do szybkości działania na współczesnych komputerach, znacząco przyczynił się producent procesorów, implementując w nich natywne instrukcje procesora, których jedynym zadaniem jest realizacja algorytmu AES.

2.3 Szyfry strumieniowe

Pisząc o szyfrach strumieniowych mam tutaj na myśli natywne szyfry strumieniowe, które zostały stworzone z myślą o pracy w trybie strumieniowym. Pomimo istnienia dwóch typów szyfrów strumieniowych - synchroniczny oraz asynchronicznych, w praktyce używany jest prawie wyłącznie pierwszy typ.

W odróżnieniu od szyfrów blokowych, które szyfrowały cały blok danych, szyfry strumieniowe szyfrują każdy bit osobno. Przy użyciu klucza kryptograficznego generują one wystarczająco długi, pseudolosowy ciąg bitów. Następnie wykonywana jest operacja XOR pomiędzy wygenerowanym ciągiem a wiadomością jaką chcemy zaszyfrować. Deszyfrowanie polega na ponownym wygenerowaniu ciągu bitów na podstawie klucza a następnie wykonanie operacji XOR na bitach zaszyfrowanej wiadomości oraz tych wygenerowanych z klucza.

2.3.1 RC4

Obecnie najczęściej spotykanym szyfrem strumieniowym jest RC4. Mimo, że wielokrotnie wykazano wiele podatności w konstrukcji RC4, szyfr ten jest ciągle używany w protokołach takich jak TLS czy WEP.

Schemat działania algorytmu jest niezwykle prosty. Składa się z inicjalizacji klucza oraz generacji pseudolosowego ciągu.

W etapie inicjalizacji klucza tworzona jest tablica permutacji S , składają się z 256 bajtów. Początkowo znajdują się w niej kolejne liczby od 0 do 255. Następnie dokonywane jest przejście po elementach tablicy, korzystając z indeksu i . Na każdym kroku pętli obliczany jest indeks j , poprzez dodanie aktualnej wartości j (zaczynającej się od 0) do wartości klucza znajdującej się pod indeksem i oraz do wartości tablicy S znajdującej się pod indeksem i . W przypadku, gdyby któryś z indeksu wyszedł poza zakres rozpatrywanych tablic, używa się operacji modulo długość tablicy. Mając obliczony indeks j zamienia się element $S[i]$ z elementem $S[j]$.

Do wygenerowania pseudolosowego ciągu wykorzystywana jest wcześniej stworzona tablica permutacji S . W pierwszej kolejności dla każdego indeksu i , obliczany jest indeks $j := j + S[i]$. Następnie zamienione są wartości $S[i]$ oraz $S[j]$. W celu otrzymania bajtu, który zostanie wykorzystany do zaszyfrowania wiadomości, pobierana jest wartość $S[S[i] + S[j]]$ z tablicy S .

2.3.2 Salsa20

W porównaniu do RC4, Salsa20 jest relatywnie nowym szyfrem strumieniowym, stworzonym przez Daniela J. Bernsteina. Bazuje on na operacjach *ARX* (*add-rotate-xor*), to jest operacji składających się z dodawania modulo, obrotów bitowych oraz funkcji *XOR*. Zaletą stosowania szyfrów *ARX* jest to, że odporne są one na ataki czasowe, polegające na mierzeniu czasu, jaki potrzebny jest do przeprowadzenia operacji kryptograficznych.

Niezwykle interesującą cechą szyfru Salsa20 jest możliwość rozpoczęcia procesu odszyfrowywania od dowolnego miejsca w strumieniu danych. Mając więc duży plik, możliwe jest odszyfrowywanie tylko tej jego części, która nas interesuje.

Na chwilę obecną nie są znane żadne praktyczne ataki na szyfr Salsa20, może on zostać użyty jako alternatywa do szyfru blokowego AES.

2.4 Kryptograficzna funkcja skrótu

Funkcją skrótu nazywana jest funkcja, która dla danych wejściowych o dowolnym rozmiarze zwraca dane o z góry ustalonej długości. Funkcje skrótu znajdują zastosowanie w takich dziedzinach jak struktury danych (tablice mieszające, filtr Blooma), algorytmy dopasowania wzorca (algorytm Karpa-Rabina) czy też w kryptografii.

Aby funkcja skrótu mogła zostać użyta w systemach kryptograficznych musi posiadać ona szereg parametrów.

Jednym z nich jest odporność na kolizje. Kolizją nazywamy przypadek, gdy dla dwóch różnych argumentów funkcja skrótu zwraca ten sam wynik. Nie jest oczywiście możliwe, aby całkowicie uniknąć kolizji, gdyż zbiór danych o dowolnym rozmiarze jest mapowany na zbiór skończony, zależy nam jednak aby proces znajdowania kolizji dla określonych danych był uważany za „trudny”. (Przez „trudny” należy tutaj rozumieć problem, który nie jest możliwy do rozwiązania w rozsądnej ilości czasu.)

Kolejny z parametrów jest częściowo związany z poprzednim. Zależy nam, aby rozpatrywana funkcja była funkcją jednokierunkową. Oznacza to, że dla danego wyniku funkcji skrótu, znalezienie argumentu jest również problemem „trudnym”. (Sam fakt istnienia funkcji jednokierunkowych nie został formalnie udowodniony. [3])

Niezwykle ważne jest też, aby nawet niewielka zmiana danych wejściowych, spowodowała znaczną zmianę danych otrzymanych na wyjściu (wymagane jest aby przynajmniej połowa bitów uległa zmianie).

2.4.1 Message Digest 5

Funkcja MD5 jest wykorzystywana do generowania 128-bitowego skrótu. Została stworzona przez Rona Rivesta w 1991 roku.

W uproszczeniu, algorytm MD5 można przedstawić w następujących krokach [8]:

1. Dodanie dopełnienia. W pierwszej kolejności dopisywany jest jeden bit o wartości 1, a następnie dopisywane są zera, aż do momentu, gdy długość danych wynosić będzie 448 bitów modulo 512. Dopełnienie dopisywane jest nawet w przypadku, gdy długość danych wynosi 448 bitów.
2. Pozostałe 64 bity wypełniane są liczbą reprezentującą długość wiadomości (sprzed wypełnienia) modulo 2^{64} .
3. Inicjalizacja stanu MD5 w postaci czterech 32-bitowych zmiennych A, B, C i D. Są one inicjalizowane stałymi zdefiniowanymi w specyfikacji (przedstawione w systemie szesnastkowym):
 $A := 01234567$

$B := 89abcdef$

$C := fedcba98$

$D := 76543210$

4. Dane wejściowe dzielone są na bloki po 512 bitów. Kolejno na każdym z bloków wykonywane są operacje bitowe zmieniające zmiennych.
5. Wynikiem działania algorytmu jest 128-bitowa wartość składająca się z omawianych czterech zmiennych w kolejności A, B, C, D.

Szczegółowa specyfikacja algorytmu znajduje się w dokumencie RFC 1321 [6].

Analiza kryptograficzna funkcji MD5 wykazała wiele podatności i błędów przez co obecnie nie jest wskazane używanie MD5 w zastosowaniach kryptograficznych. W roku 2004 została opublikowana praca wykazująca podatność funkcji MD5 na ataki kolizyjne (ang. collision attack) [4]. Cztery lata później został znaleziony atak na kody uwierzytelnienia wiadomości bazujące na funkcji MD5 [5].

2.4.2 Secure Hash Algorithm 1

SHA-1 jest funkcją bazującą na MD4 (podobnie jak MD5), o długości skrótu wynoszącej 160 bitów [10].

Wewnętrzny stan funkcji składa się z pięciu zmiennych: A, B, C, D oraz E, każda o rozmiarze 32 bitów.

Pseudokod algorytmu można przedstawić w następujących krokach:

1. Inicjalizacja zmiennych następującymi stałymi (przedstawione w systemie szesnastkowym):

$A := 0x67452301$

$B := 0xEFCDAB89$

$C := 0x98BADCFE$

$D := 0x10325476$

$E := 0xC3D2E1F0$

2. Zaaplikowanie dopełnienia:

- (a) Dopisanie na koniec danych bitu o wartości 1.

Przykładowo jeśli przetwarzane są dane *01011001*, to są one dopełniane do *010110011*.

- (b) Następnie dopisywane są bity o wartości 0, aż do momentu, gdy długość danych wynosić będzie 448 bitów modulo 512.

Mając dane *00101101 01000010 10011101 10001010 00101101 10011101*, po zastosowaniu dopełnienia z kroku (a) otrzymujemy *00101101 01000010 10011101 10001010 00101101 10011101 1*. Jako że długość danych wynosi 49 bitów, wymagane jest dopisanie 399 zer. Po zastosowaniu dopełnienia otrzymujemy (reprezentacja heksadecymalna):

2d429d8a 2d9d8000 00000000 00000000

```
00000000 00000000 00000000 00000000
00000000 00000000 00000000 00000000
00000000 00000000
```

- (c) W ostatnim kroku na miejsce ostatnich 64 bitów dopisywana jest długość danych.

```
2d429d8a 2d9d8000 00000000 00000000
00000000 00000000 00000000 00000000
00000000 00000000 00000000 00000000
00000000 00000000 00000000 00000031
```

3. Podzielenie wiadomości na 512-bitowe bloki.

4. Dla każdego z bloków należy wykonać następujące operacje:

- (a) Podzielenie bloku na szesnaście 32-bitowych części $w[i], 0 \leq i \leq 15$.

- (b) Rozszerzenie 16 części do 80 korzystając ze wzoru:

$$w[i] = (w[i-3] \oplus w[i-8] \oplus w[i-14] \oplus w[i-16]) \ll 1$$

- (c) Inicjalizacja zmiennych pomocniczych dla danego bloku

$a := A$

$b := B$

$c := C$

$d := D$

$e := E$

- (d) Dla każdej z 80 części $w[i]$ należy wykonać:

- i. jeżeli $0 \leq i \leq 19$

$$f := (b \& c) \mid ((\sim b) \& d)$$

$$k := 0x5A827999$$

- ii. jeżeli $20 \leq i \leq 39$

$$f := b \oplus c \oplus d$$

$$k := 0x6ED9EBA1$$

- iii. jeżeli $40 \leq i \leq 59$

$$f := (b \& c) \mid (b \& d) \mid (c \& d)$$

$$k := 0x8F1BBCDC$$

- iv. jeżeli $60 \leq i \leq 79$

$$f := b \oplus c \oplus d \quad k := 0xCA62C1D6$$

- v. następnie

$$t := (a \lll 5) + f + e + k + w[i]$$

$$e := d$$

$$d := c$$

$$c := b \lll 30$$

$$b := a$$

$$a := t$$

(e) Aktualizacja wewnętrznego stanu funkcji

$$A := A + a$$
$$B := B + b$$
$$C := C + c$$
$$D := D + d$$
$$E := E + e$$

5. Zwrócenie wyniku w postaci:

$$(A \ll 128) \mid (B \ll 96) \mid (C \ll 64) \mid (D \ll 32) \mid E$$

W dokumencie RFC 3174 zostały zawarte szczegóły dotyczące algorytmu, jak również przykładowa implementacja [7].

Podobnie jak MD5, funkcja SHA-1 również nie jest uważana za bezpieczną.

Do roku 2017 wszystkie przedstawione ataki uznawane były za niepraktyczne z uwagi na zbyt dużą moc obliczeniową, jaka byłaby potrzebna do ich wykonania. Przykładem może być tutaj atak opublikowany w październiku 2015 roku o nazwie *The SHAppening*. Koszt wynajęcia sprzętu potrzebnego do przeprowadzenia ataku (wygenerowania jednej kolizji) estymowany był na 75 000 - 120 000 dolarów amerykańskich [11].

Pierwszy praktyczny atak na SHA-1 został ogłoszony w lutym 2017 roku. Zostały wygenerowane dwa pliki w formacie PDF, dla których wynik funkcji skrótu SHA-1 jest taki sam. Wszystkie systemy, w których wykorzystywana jest funkcja SHA-1 są narażone na ten atak, przykładowo umożliwia on fałszowanie podpisów cyfrowych dokumentów, czy też certyfikatów HTTPS. [12]

2.4.3 Secure Hash Algorithm 2

SHA-2 jest rodziną funkcji składającą się z SHA-224, SHA-256, SHA-384, SHA-512, SHA-512/224, SHA-512/256. Funkcje te generują skróty o długościach odpowiednio: 224, 256, 384, 512, 224 oraz 256 bitów.

SHA-256

Jedną z najczęściej używanych funkcji z rodziny SHA-2 jest SHA-256. Proces uzyskiwania skrótu SHA-256 jest następujący:

1. Inicjalizacja stanu wewnętrznego funkcji (przedstawione w systemie szesnastkowym):

$$A := 0x6a09e667$$
$$B := 0xbb67ae85$$
$$C := 0x3c6ef372$$
$$D := 0xa54ff53a$$
$$E := 0x510e527f$$
$$F := 0x9b05688c$$
$$G := 0x1f83d9ab$$
$$H := 0x5be0cd19$$

2. Inicjalizacja pomocniczych stałych.

$$k[0..63] := \begin{array}{llll} 0x428a2f98, & 0x71374491, & 0xb5c0fbcf, & 0xe9b5dba5, \\ 0x3956c25b, & 0x59f111f1, & 0x923f82a4, & 0xab1c5ed5, \\ 0xd807aa98, & 0x12835b01, & 0x243185be, & 0x550c7dc3, \\ 0x72be5d74, & 0x80deb1fe, & 0x9bdc06a7, & 0xc19bf174, \\ 0xe49b69c1, & 0xefbe4786, & 0x0fc19dc6, & 0x240ca1cc, \\ 0x2de92c6f, & 0x4a7484aa, & 0x5cb0a9dc, & 0x76f988da, \\ 0x983e5152, & 0xa831c66d, & 0xb00327c8, & 0xbf597fc7, \\ 0xc6e00bf3, & 0xd5a79147, & 0x06ca6351, & 0x14292967, \\ 0x27b70a85, & 0x2e1b2138, & 0x4d2c6dfc, & 0x53380d13, \\ 0x650a7354, & 0x766a0abb, & 0x81c2c92e, & 0x92722c85, \\ 0xa2bfe8a1, & 0xa81a664b, & 0xc24b8b70, & 0xc76c51a3, \\ 0xd192e819, & 0xd6990624, & 0xf40e3585, & 0x106aa070, \\ 0x19a4c116, & 0x1e376c08, & 0x2748774c, & 0x34b0bcb5, \\ 0x391c0cb3, & 0x4ed8aa4a, & 0x5b9cca4f, & 0x682e6ff3, \\ 0x748f82ee, & 0x78a5636f, & 0x84c87814, & 0x8cc70208, \\ 0x90befffa, & 0xa4506ceb, & 0xbef9a3f7, & 0xc67178f2 \end{array}$$

3. Zaaplikowanie dopełnienia. Proces ten przebiega identycznie jak w przypadku SHA-1.

4. Podzielenie wiadomości na 512-bitowe bloki.

5. Dla każdego z bloków należy wykonać następujące operacje:

(a) Podzielenie bloku na szesnaście 32-bitowych części $w[i], 0 \leq i \leq 15$.

(b) Rozszerzenie 16 części do 64 korzystając ze wzoru:

$$\begin{aligned} s0 &:= (w[i-15] \ggg 7) \oplus (w[i-15] \ggg 18) \oplus (w[i-15] \gg 3) \\ s1 &:= (w[i-2] \ggg 17) \oplus (w[i-2] \ggg 19) \oplus (w[i-2] \gg 10) \\ w[i] &:= w[i-16] + s0 + w[i-7] + s1 \end{aligned}$$

(c) Inicjalizacja zmiennych pomocniczych dla danego bloku

$$\begin{aligned} a &:= A \\ b &:= B \\ c &:= C \\ d &:= D \\ e &:= E \\ f &:= F \\ g &:= G \\ h &:= H \end{aligned}$$

(d) Dla każdej z 64 części $w[i]$ należy wykonać:

$$\begin{aligned} S1 &:= (e \ggg 6) \oplus (e \ggg 11) \oplus (e \ggg 25) \\ ch &:= (e \& f) \oplus ((\sim e) \& g) \\ t1 &:= h + S1 + ch + k[i] + w[i] \\ S0 &:= (a \ggg 2) \oplus (a \ggg 13) \oplus (a \ggg 22) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
m &:= (a \& b) \oplus (a \& c) \oplus (b \& c) \\
t2 &:= S0 + m \\
h &:= g \\
g &:= f \\
f &:= e \\
e &:= d + t1 \\
d &:= c \\
c &:= b \\
b &:= a \\
a &:= t1 + t2
\end{aligned}$$

(e) Aktualizacja wewnętrznego stanu funkcji

$$\begin{aligned}
A &:= A + a \\
B &:= B + b \\
C &:= C + c \\
D &:= D + d \\
E &:= E + e \\
F &:= F + f \\
G &:= G + g \\
H &:= H + h
\end{aligned}$$

6. Zwrócenie wyniku w postaci:

$$\begin{aligned}
&(A \ll 224) \mid (B \ll 192) \mid (C \ll 160) \mid \\
&(D \ll 128) \mid (E \ll 96) \mid (F \ll 64) \mid (G \ll 32) \mid H
\end{aligned}$$

W porównaniu do SHA-1 są znacznie odporniejsze na kolizję, dzięki czemu zalecane jest ich używanie w zastosowaniach takich jak podpisy cyfrowe czy uwierzytelnianie wiadomości.

2.4.4 Secure Hash Algorithm 3

Wewnętrzna budowa funkcji z rodziny SHA-3 znacząco się różni w odniesieniu do omawianych wcześniej. Poprzednie funkcje oparte były o schemat Merkle–Damgård. Funkcje z rodziny SHA-3 oparte są o tak zwaną „architekturę gąbki”. W obu przypadkach funkcja zawiera wewnętrzny stan. Różnica jest jednak w sposobie otrzymywania wyniku na podstawie tego stanu. Poprzednio zwrócenie przez funkcję wyniku było równoznaczne ze zwróceniem wewnętrznego stanu funkcji. W przypadku SHA-3 tak się nie dzieje. Wewnętrzny stan przepuszczany jest kolejne cykle algorytmu. Na wynik funkcji składają się części wewnętrznego stanu, pobierane w kolejnych cyklach. Skutkuje to tym, że nigdy nie jest ujawniany cały wewnętrzny stan funkcji.

Ulepszona wewnętrzna konstrukcja algorytmu zapobiega atakom typu „length extension”, na który podatne są funkcje MD5, SHA-1 oraz SHA-2 [9].

2.5 Kod uwierzytelnienia wiadomości

2.6 MAC bazujący na funkcji skrótu

2.7 Pojęcia entropii

3 Kryptografia w praktyce

3.1 Pojęcia pomocnicze

Przed przystąpieniem do opisu praktycznych aspektów kryptografii użytych w projekcie, wymagane jest wyjaśnienie pojęć wykorzystywanych w mechanizmie hasel jednorazowych, lecz które nie są bezpośrednio związane z kryptografią.

3.1.1 Kodowanie transportowe

Kodowanie transportowe wykorzystywane jest w przypadku, gdy zachodzi potrzeba transferu danych w środowiskach, które pozwalają na przesyłanie wyłącznie znaków ASCII.

Użycie kodowania transportowego jest konieczne w celu zachowania kompatybilności przy pracy z protokołami, które przystosowane są do pracy na danych 7-bitowych. W takim przypadku najstarszy bit jest zerowany, co mogłoby uszkodzić przesyłane dane. W przypadku przesyłania wyłącznie znaków ASCII zerowanie najstarszego bitu nie jest problemem, gdyż wszystkie znaki w podstawowej tablicy ASCII mają ten bit wyzerowany.

Bardziej współczesnym przykładem wykorzystania kodowania transportowego jest osadzanie danych graficznych bezpośrednio w kodzie HTML. Konieczne jest wówczas zakodowanie danych w celu wyeliminowania ryzyka pojawienia się znaków '<' oraz '>', które mogłyby być zinterpretowane jako tagi HTML.

Aby ujednolicić implementacje kodowania transportowego został stworzony dokument RFC 4648 [2], w którym opisany jest prawidłowy sposób implementacji oraz to jaki typ kodowania wybrać w zależności od nałożonych wymagań.

Kodowanie Base64

Najczęściej spotykanym typem kodowania transportowego jest kodowanie Base64. Kodowanie to konwertuje dowolny ciąg bajtów do postaci ciągu złożonego z małych i wielkich liter, cyfr oraz znaków '+' i '/'. Jeżeli po zakodowaniu końcowa część danych jest mniejsza niż 24 bity używany jest także znak '=' jako dopełnienie.

Sam proces kodowania polega na pobraniu 24 bitów danych a następnie podzieleniu ich na 4 grupy po 6 bitów. Każda z grup jest interpretowana jako indeks tablicy ustalonego alfabetu Base64. Dla każdej z grup za pomocą indeksu odczytywany jest znak a następnie dopisywany jest on do ciągu zakodowanego.

Istnieje również odmiana kodowania Base64 przystosowana do użycia w przypadku adresów URL czy nazw plików. W alternatywie tej zamiast znaków '+', '/', które mogłyby zostać błędnie zinterpretowane np w środowisku systemu plików, używane są znaki '-' oraz '_'.

Kodowanie Base32

W porównaniu do kodowania Base64, dane zakodowane w Base32 są dużo bardziej czytelne dla ludzi. Właściwość ta spowodowana jest faktem, że w kodowaniu Base32 nie ma znaczenia wielkość liter, dzięki czemu przykładowo nie ma problemu z rozróżnieniem małej litery 'L' z wielką literą 'I' ('l' oraz 'I').

Alfabet kodowania Base32 składa się z 32 znaków ASCII oraz znaku '=' pełniącego funkcję dopełnienia. Proces kodowania polega na pobraniu 40 bitów danych a następnie ustawienie ich w osiem 5-bitowych grup. Każda z 8 grup interpretowana jest jako jeden ze znaków alfabetu Base32.

Podobnie jak przy kodowaniu Base64, wymagane jest tutaj wstawienie dopełnienia w sytuacji, gdy długość ostatniej z grup jest mniejsza od 40 bitów.

Tabela 3.1. Alfabet w kodowaniu Base32

Indeks	Znak	Indeks	Znak	Indeks	Znak	Indeks	Znak
0	A	9	J	18	S	27	3
1	B	10	K	19	T	28	4
2	C	11	L	20	U	29	5
3	D	12	M	21	V	30	6
4	E	13	N	22	W	31	7
5	F	14	O	23	X		
6	G	15	P	24	Y		
7	H	16	Q	25	Z		
8	I	17	R	26	2		

3.1.2 Czas uniksowy

Czas uniksowy jest sposobem na reprezentację punktu w czasie, polegającym na mierzeniu sekund, które upłynęły od daty 1 stycznia 1970 (UTC). W systemach uniksowych zwykle reprezentowany jest w postaci 32-bitowej liczby całkowitej ze znakiem.

W przypadku architektur typu serwer-klient wskazane jest synchronizowanie czasu wykorzystując czas uniksowy, gdyż nie zależy on od lokalizacji w której jest mierzony. Właściwość ta eliminuje problem synchronizacji czasu pomiędzy strefami czasowymi.

3.1.3 Ujednolicony identyfikator zasobów

Ujednolicony identyfikator zasobów (ang. Uniform Resource Identifier, URI) jest ciągiem znaków jednoznacznie identyfikującym dany zasób.

Składnia identyfikatora jest wyrażana następująco:

schemat ":" ścieżka ["?" zapytanie] ["#" fragment]

Warto zauważyć, że składnia ta determinuje schemat (protokół), jaki wykorzystywany jest przy interakcji z identyfikowanym zasobem.

Przykłady identyfikatorów:

- `ftp://randomftp.com/files/file.docx`
- `https://www.randomwebsite.pl/index.html`
- `mailto:jan.nowak@wp.pl`
- `tel:+48-25-123-88`

Szczegóły dotyczące standardu URI są opisane w dokumencie RFC 3986 [1].

3.2 Hasło jednorazowe

3.3 Interfejs Windows Data Protection

4 Ataki na mechanizm OTP

4.1 Atak urodzinowy

4.2 Side-channel attacks

4.3 Atak przez powtórzenie

4.4 Atak „Man in the middle”

4.5 Phishing

5 PicnicAuth

5.1 Architektura projektu

5.2 Generowanie OTP po stronie użytkownika

5.3 Przechowywanie sekretu użytkownika

5.4 Przykład użycia projektu

5.5 Planowane ulepszenia

6 Zakończenie

6.1 Podsumowanie i wnioski

6.2 Podziękowania

7 Spis literatury

- [1] T. Berners-Lee, R. Fielding, L. Masinter., *Uniform Resource Identifier (URI): Generic Syntax*.
<https://tools.ietf.org/pdf/rfc3986.pdf>, 2005
- [2] S. Josefsson, *The Base16, Base32, and Base64 Data Encodings*
<https://tools.ietf.org/pdf/rfc4648>, SJD, 2006
- [3] Oded Goldreich, *Foundations of Cryptography: Volume 1, Basic Tools* Cambridge University Press. ISBN 0-521-79172-3., 2001
- [4] Arjen Lenstra, Xiaoyun Wang, and Benne de Weger. Colliding x.509 certificates. Cryptology ePrint Archive, Report 2005/067, 2005.
- [5] Xiaoyun Wang, Hongbo Yu, Wei Wang, Haina Zhang, and Tao Zhan. *Cryptanalysis on HMAC/NMAC-MD5 and MD5-MAC*. EUROCRYPT 2009
- [6] R. Rivest, *The MD5 Message-Digest Algorithm*
<https://tools.ietf.org/pdf/rfc1321.pdf>, MIT, 1992
- [7] D. Eastlake, 3rd, P. Jones *US Secure Hash Algorithm 1 (SHA1)*
<https://tools.ietf.org/pdf/rfc3174>, 2001
- [8] Laurens Van Houtven (lvh), *Crypto 101*
<https://www.crypto101.io>, 2017
- [9] Keccak Team, *Strengths of Keccak - Design and security*
https://keccak.team/keccak_strengths.html, 2017
- [10] Niels Ferguson, Bruce Schneier, Todayoshi Kohno *Cryptography Engineering: Design Principles and Practical Applications*. Wiley Publishing, Inc., 2010
- [11] Marc Stevens, Pierre Karpman, Thomas Peyrin, *The SHAppening: freestart collisions for SHA-1*.
<https://sites.google.com/site/itstheshappening>, 2015
- [12] Marc Stevens, Elie Bursztein, Pierre Karpman, Ange Albertini, Yarik Markov *The first collision for full SHA-1*.
<https://shattered.io/static/shattered.pdf>, CWI Amsterdam, Google Research, 2017
- [13] Thai Duong, Julian Rizzo, *Here Come The \oplus Ninjas*.
<https://bug665814.bmoattachments.org/attachment.cgi?id=540839>, 2011

- [14] SciEngines GmbH *Break DES in less than a single day*.
<https://www.voltage.com/technology/rivyera-from-sciengines/>, 2008
- [15] *DES-III contest*.
<http://www.distributed.net/DES>, 1999

Wyrażam zgodę na udostępnienie mojej pracy w czytelniach Biblioteki SGGW w tym w Archiwum Prac Dyplomowych SGGW.

.....
(czytelny podpis autora pracy)