

## Podstawy kryptografii

Andrzej M. Borzyszkowski

Instytut Informatyki  
Uniwersytet Gdański

sem. zimowy 2022/2023

[inf.ug.edu.pl/~amb/](http://inf.ug.edu.pl/~amb/)

## Integralność danych: MAC i funkcje skrótu

### Integralność a prywatność

- Prywatność: Ewa nie potrafi odczytać wiadomości  $m$  z kryptogramu  $c$ 
  - czy potrafi go zmienić złośliwie? (integralność)
- Szyfr strumieniowy
  - $c = m \oplus G(k)$ , zmiana bitu w  $c$  zmienia ten sam bit w  $m$
- Szyfr blokowy w trybach OFB oraz CTR
  - zasada szyfrowania jest podobna
  - zmiana bitu w  $c$  zmienia ten sam bit w  $m$
- Szyfr blokowy w trybie ECB
  - zmiana bitu w  $c$  zmienia cały blok w wiadomości  $m$
  - można bezkarnie zmienić kolejność bloków
- Szyfr blokowy w trybie CBC
  - zmiana bitu w  $IV$  zmienia bit w pierwszym bloku  $m$
  - nagłówki pliku często ma ważne informacje

### Integralność – definicja

- MAC (message authentication code)
  - algorytm generowania klucza  $k$  (np. losowy wybór)
  - algorytm obliczania  $MAC(k, m)$  dla klucza i wiadomości  $m$
  - algorytm weryfikacji dla klucza  $k$ , wiadomości  $m$  oraz kodu uwierzytelniającego  $t$
- Alicja i Bolek uzgodnili klucz  $k$ 
  - Alicja przesyła wiadomość  $m$  oraz kod uwierzytelniający  $t = MAC(k, m)$
  - Bolek otrzymuje wiadomość  $m'$  oraz kod  $t'$  i weryfikuje prawidłowość otrzymanych danych
  - w praktyce sprawdza czy  $t' = MAC(k, m')$
  - na pewno warunek zajdzie jeśli nie było zmian w przesyłanych komunikatach

## Funkcje skrótu

Podstawy kryptografii

Andrzej Borzyszkowski

Wykład 5

Integralność – definicja

Funkcje skrótu

MAC dla ciągów dowolnej długości

SHA-1

Szyfrowanie i uwierzytelnianie

- Dowolna funkcja  $h : [*] \rightarrow [n]$ 
  - dziedzina: ciągi bitów dowolnej (dużej) długości
  - przeciwdziedzina: ciągi bitów długości ustalonej i niedużej
- Przykład  $h : [n + n] \rightarrow [n]$ ,  $h(x, y) = x \oplus y$ 
  - funkcję tę można iterować i przetwarzać ciągi dowolnej długości:  $H(x, \langle y, Z \rangle) = H(h(x, y), Z)$
  - dla dowolnego ciągu bitów trzeba jeszcze uzupełnić ostatni niepełny blok
- Własności takiej funkcji  $H$ 
  - łatwo się oblicza (w przykładzie jest to po prostu suma)
  - łatwo znaleźć dwa ciągi t.ż.  $H(x) = H(y)$

## Zastosowania funkcji skrótu

Podstawy kryptografii

Andrzej Borzyszkowski

Wykład 5

Integralność – definicja

Funkcje skrótu

MAC dla ciągów dowolnej długości

SHA-1

Szyfrowanie i uwierzytelnianie

- Nie kryptograficzne:
  - znajdowanie indeksów tablic dla argumentów ze zbioru  $[*]$  albo zbioru  $[N]$  dla dużego  $N$  (tablice mieszające)
  - wykrywanie przypadkowych błędów transmisji: przesyłane są wiadomość  $m$  oraz skrót  $h(m)$ , odczytywane są  $m_1$  oraz  $h_1$ , jeśli  $h(m_1) \neq h_1$ , to znaczy, że wystąpił błąd
- Kryptograficzne:
  - wykrywanie celowych i złośliwych zmian dokumentów
  - w szczególności zobowiązanie bitowe
  - skrócenie wiadomości dla kryptografii asymetrycznej (podpis)
- Inne nazwy:
  - *hash*, odcisk palca (*fingerprint*), *message digest*
  - MAC (dla funkcji z hasłem)

## Własności kryptograficznych funkcji skrótu

Podstawy kryptografii

Andrzej Borzyszkowski

Wykład 5

Integralność – definicja

Funkcje skrótu

MAC dla ciągów dowolnej długości

SHA-1

Szyfrowanie i uwierzytelnianie

- Dana wiadomość  $m$  oraz skrót  $h(m)$ 
  - zmieniona wiadomość  $m_1$  oraz  $h(m_1)$
  - jeśli  $h(m) = h(m_1)$  to nie ma sposobu wykrycia zmiany
  - w.p.p. atakujący musi przekazać inny skrót
- Postulowane własności:
  - łatwo obliczyć (MAC wymaga hasła, z hasłem ma być łatwy)
  - trudno jest znaleźć jakiegokolwiek  $m$  t.ż.  $h(m) = y$  (*funkcja jednokierunkowa, problem 1. przeciwobrazu*)
  - trudno jest znaleźć  $m_1$  t.ż.  $h(m_1) = h(m)$  dla danego  $m$  (*słaba bezkolizyjność, problem 2. przeciwobrazu*)
  - trudno jest znaleźć jakiegokolwiek dwie wiadomości  $m$  oraz  $m_1$  takie że  $h(m) = h(m_1)$  (*silna bezkolizyjność*)

## Model losowej wyroczni – atak egzystencjalny

Podstawy kryptografii

Andrzej Borzyszkowski

Wykład 5

Integralność – definicja

Funkcje skrótu

MAC dla ciągów dowolnej długości

SHA-1

Szyfrowanie i uwierzytelnianie

- Wartości funkcji skrótu są nieprzewidywalne
- Założenie:  $h : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{Y}$ 
  - znamy wartości  $h(x)$  dla podzbioru  $x \in \mathcal{X}_0$
  - dla każdego innego argumentu  $P(h(x) = y_0) = \frac{1}{|\mathcal{Y}|}$
- Odporność na atak
  - wybrany jest pewien klucz  $k$
  - Ewa ma dostęp do wyroczni obliczającej  $MAC(k, \_)$
  - Ewa wygrywa jeśli znajdzie prawidłowy skrót dla *jakiegokolwiek* nowej wiadomości
- Atak przez powtórzenie (Ewa kopiuje wiadomość ze skrótem)
  - nie jest objęty tą definicją
  - wymaga pojęcia stanu
  - np. uzgodniony zegar, albo licznik

## Atak urodzinowy

Podstawy kryptografii

Andrzej Borzyszkowski

Wykład 5

Integralność – definicja

Funkcje skrótu

MAC dla ciągów dowolnej długości

SHA-1

Szyfrowanie i uwierzytelnianie

- Jakie jest prawdopodobieństwo, że dwie osoby spośród  $n$  mają urodziny tego samego dnia?
  - dla  $n = 2$ , prawd.  $\approx \frac{1}{366}$
  - dla  $n = 367$ , prawd.  $= 1$
  - dla  $n = 23$ , prawd.  $> \frac{1}{2}$
- Prawd.  $\approx \exp(-n^2/2N)$ 
  - jest znacznie większe niż żądanie, by zachodziła równość z zadaną wartością
  - dla dwóch zestawów liczb  $< N$  o wielkości  $\sqrt{N}$  elementów jest duża szansa na wspólny element
  - np. dla  $N = 2^{56}$  wystarczy zgromadzić zestawy po  $2^{28}$  elementów, czyli gigabajty
- Szukanie kolizji: próbka możliwych skrótów wielkości  $\sqrt{N}$  ma znaczące prawdopodobieństwo kolizji
  - wniosek: funkcja skrótu musi dawać w wyniku co najmniej 160 bitów, raczej więcej

## Funkcja pseudolosowa jako MAC

Podstawy kryptografii

Andrzej Borzyszkowski

Wykład 5

Integralność – definicja

Funkcje skrótu

MAC dla ciągów dowolnej długości

SHA-1

Szyfrowanie i uwierzytelnianie

- Dana funkcja pseudolosowa  $F : [n] \times [n] \rightarrow [n]$
- $MAC(k, m) = F(k, m)$ 
  - weryfikacja:  $t = MAC(k, m)$
- Twierdzenie: jest to bezpieczny algorytm uwierzytelniania dla ciągów ustalonej długości
  - dla funkcji losowej wartości  $f(x)$  oraz  $f(y)$  są niezależne,
  - funkcja pseudolosowa jest PPT nieodróżnialna od losowej
  - więc znajomość wielu wartości nie pomaga w znalezieniu nowej
- Problemem jest nadal funkcja  $MAC : [n] \times [*] \rightarrow [*]$  dla ciągów dowolnej długości
  - a w praktyce będziemy żądać by  $MAC : [n] \times [*] \rightarrow [\ell]$ , stała długość

## MAC dla ciągów dowolnej długości

Podstawy kryptografii

Andrzej Borzyszkowski

Wykład 5

Integralność – definicja

Funkcje skrótu

MAC dla ciągów dowolnej długości

SHA-1

Szyfrowanie i uwierzytelnianie

- Pomysł nieprawidłowy:
- Obliczyć  $\oplus$  dla wszystkich bloków i wtedy MAC tej sumy
  - łatwo zmienić wiadomość zachowując sumę
- Obliczyć MAC dla każdego bloku osobno
  - można zmienić kolejność bloków
  - wiadomość można po prostu uciąć
  - można sklejać fragmenty różnych wiadomości
- Obliczyć MAC dla bloków numerowanych
  - nadal wiadomość można uciąć
  - nadal można sklejać fragmenty różnych wiadomości
- Obliczyć MAC dla bloków numerowanych i posiadających informację o łącznej długości
  - nadal można sklejać fragmenty różnych wiadomości zachowując długość

## MAC dla ciągów dowolnej długości c.d.

Podstawy kryptografii

Andrzej Borzyszkowski

Wykład 5

Integralność – definicja

Funkcje skrótu

MAC dla ciągów dowolnej długości

SHA-1

Szyfrowanie i uwierzytelnianie

- Rozwiązanie: każdy blok zawiera:
  - numer bloku (uniemożliwia przestawienie)
  - długość pliku (np. liczbę bloków, uniemożliwia ucięcie)
  - liczbę jednorazową (uniemożliwia sklejać wiadomości)
  - oraz fragment wiadomości
  - MAC jest zestawem: liczba jednorazowa i ciąg MAC bloków
- Rozwiązanie to jest całkowicie niepraktyczne
  - numer bloku i długość pliku zajmą co najmniej po 32 bity lub więcej
  - liczba jednorazowa nawet 64 bitowa może być niewystarczająca
  - bloku musiałby być wielkości znacznie większej niż 128 bitów
  - MAC byłby co najmniej dwa razy dłuższy niż sama wiadomość

## MAC dla ciągów dowolnej długości w trybie CBC

Podstawy kryptografii

Andrzej Borzyszkowski

Wykład 5

Integralność – definicja

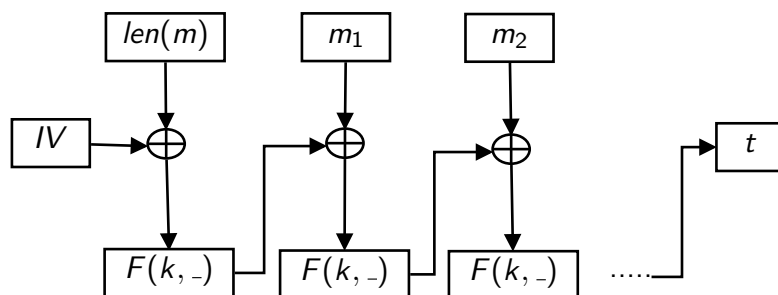
Funkcje skrótu

MAC dla ciągów dowolnej długości

SHA-1

Szyfrowanie i uwierzytelnianie

- Cel:
  - MAC powinien dawać wynik stałej długości
  - powinien stosować się do ciągów naprawdę długich
- MAC działa jak tryb blokowy CBC
  - ale tylko ostatni blok jest zwracany
  - wektor początkowy jest ustalony w definicji algorytmu
  - długość pliku też jest kodowana



## Szyfrowanie w trybie CBC a MAC – różnice

Podstawy kryptografii

Andrzej Borzyszkowski

Wykład 5

Integralność – definicja

Funkcje skrótu

MAC dla ciągów dowolnej długości

SHA-1

Szyfrowanie i uwierzytelnianie

- Wektor początkowy
  - dla szyfrowania jest niezbędny, zapewnia niedeterminizm
  - niedeterminizm dla obliczania MAC jest szkodliwy, umożliwia zmianę pierwszego bloku wiadomości
- Zestaw wyników funkcji losowej
  - dla szyfrowania jest niezbędny, umożliwia zastosowanie algorytmu odwrotnego (odszyfrowanie)
  - dla MAC jest niepotrzebny
- Kodowanie długości
  - dla szyfrowania jest niepotrzebne, cała wiadomość jest odtwarzana
  - dla MAC nie ma innego sposobu zaznaczenia długości pliku
  - gdyby zwracać wszystkie MAC'i też nie byłoby bezpiecznie
  - są powody, by długość kodować jako pierwszy blok

## Metoda Merkle-Damgarda

Podstawy kryptografii

Andrzej Borzyszkowski

Wykład 5

Integralność – definicja

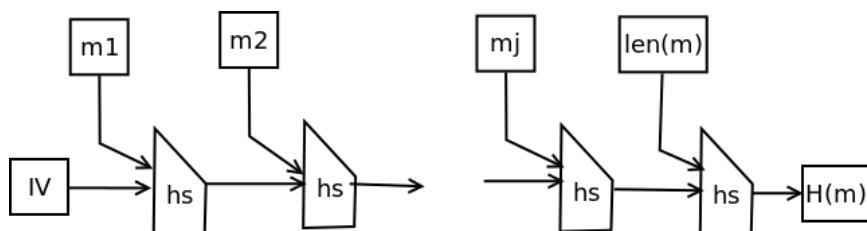
Funkcje skrótu

MAC dla ciągów dowolnej długości

SHA-1

Szyfrowanie i uwierzytelnianie

- Dana funkcja  $h_s : [n + n] \rightarrow [n]$  (funkcja kompresji)
  - (może zależna od dodatkowego parametru  $s$ )
  - iteracja dla ciągów dowolnej długości:  
 $H(x, \langle y, Z \rangle) = H(h_s(x, y), Z)$
  - dla dowolnego ciągu bitów trzeba jeszcze uzupełnić ostatni, niepełny blok ciągu
  - na końcu blok kodujący długość pliku
  - wektor początkowy jest ustalony



## Metoda Merkle-Damgarda, własności

Podstawy kryptografii

Andrzej Borzyszkowski

Wykład 5

Integralność – definicja

Funkcje skrótu

MAC dla ciągów dowolnej długości

SHA-1

Szyfrowanie i uwierzytelnianie

- Twierdzenie: jeśli funkcja kompresji  $h_s$  ma własność bezkolizyjności, to funkcja  $H$  też ma taką własność
  - dw. gdyby dwie wiadomości miały ten sam skrót  $H$
  - to albo będą się różnić wielkością (ostatni blok da kontrprzykład dla  $h_s$ )
  - albo będą się różnić wcześniej, wcześniejszy blok da kontrprzykład dla  $h_s$
- MAC w algorytmie Merkle-Damgarda
  - NMAC (*nested MAC*): dla klucza  $k$  dodatkowy blok na końcu  $h_s(k, H(m))$

## Standard SHA-1 (secure hash algorithm)

Podstawy kryptografii

Andrzej Borzyszkowski

Wykład 5

Integralność – definicja

Funkcje skrótu

MAC dla ciągów dowolnej długości

SHA-1

Szyfrowanie i uwierzytelnianie

- Opracowany przez NIST (National Institute of Standards and Technology)
  - pierwsza wersja była niedoskonała, stąd SHA-1
  - produkuje skrót 160 bitowy
- Standard określa funkcję kompresji, jest ona iterowana
  - $m = \{m_0, m_1, m_2, \dots\}$ ,  $X_0$  początkowa wartość rejestru,  $X_{j+1} = h(X_j, m_j)$ ,  $h(m)$  jest równe ostatniej wartości rejestru
  - standard określa też początkową wartość rejestru oraz sposób wypełnienia ostatniego bloku: ostatnie 64 bity określają długość  $m$ , brakujące są uzupełnione zerami

## SHA-1 dla jednego bloku

Podstawy kryptografii

Andrzej Borzyszkowski

Wykład 5

Integralność – definicja

Funkcje skrótu

MAC dla ciągów dowolnej długości

SHA-1

Szyfrowanie i uwierzytelnianie

- Operacje nieliniowe: 'and', 'or' bitowo
  - operacje liniowe: 'not',  $\oplus$  czyli dodawanie modulo 2, dodawanie modulo  $2^{32}$ , przesunięcie bitów w lewo
  - definicja funkcji pomocniczych
$$f(B, C, D) = (B \wedge C) \vee ((\neg B) \wedge D),$$
$$f(B, C, D) = B \oplus C \oplus D, \dots$$
  - definicja 85 stałych 32 bitowych
- Rejestr ma 5 elementów:  $A, B, C, D, E$  po 32 bity, inicjalizowanych przez 5 stałych, blok ma 16 fragmentów 32-bitowych
  - dla 80 rund obliczamy
$$\text{shift}_5(A) + f(B, C, D) + E + W + K \mapsto A, A \mapsto B,$$
$$\text{shift}_{30}(B) \mapsto C, C \mapsto D, D \mapsto E, f \text{ są różne dla różnych rund, } K \text{ kolejną stałą, } W \text{ jest początkowo fragmentem bloku, później } W_j = \text{shift}(W_{j-3} \oplus W_{j-8} \oplus W_{j-14} \oplus W_{j-16})$$

## Jedna runda w SHA-1

Podstawy kryptografii

Andrzej Borzyszkowski

Wykład 5

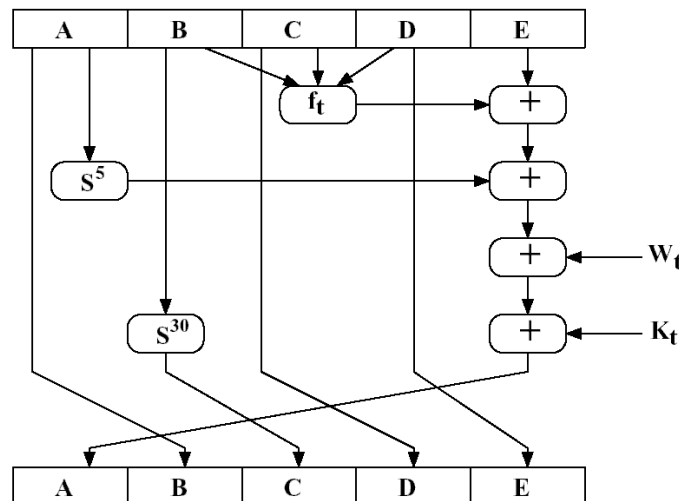
Integralność – definicja

Funkcje skrótu

MAC dla ciągów dowolnej długości

SHA-1

Szyfrowanie i uwierzytelnianie



[http://nsfsecurity.pr.erau.edu/crypto/sha\\_1.html](http://nsfsecurity.pr.erau.edu/crypto/sha_1.html)  
cytat za *Cryptography and Network Security: Principles and Practice*  
William Stallings

## MD5

Podstawy kryptografii

Andrzej Borzyszkowski

Wykład 5

Integralność – definicja

Funkcje skrótu

MAC dla ciągów dowolnej długości

SHA-1

Szyfrowanie i uwierzytelnianie

- Autor: Rivest
- Skrót 128 bitowy
  - 4 rejestry 32 bitowe
  - 64 rundy (4 cykle po 16)
  - w każdym cyklu inna funkcja nieliniowa z efektem lawinowym, przesunięcia bitów, dodawanie z bieżącymi danymi
- Znalaziono kolizje!
- MD2, inna funkcja
  - bardzo wolna
  - ale chyba bezpieczniejsza
  - jest używana w protokole PEM, bezpiecznej poczty elektronicznej

## Inne funkcje skrótu

Podstawy kryptografii

Andrzej Borzyszkowski

Wykład 5

Integralność – definicja

Funkcje skrótu

MAC dla ciągów dowolnej długości

SHA-1

Szyfrowanie i uwierzytelnianie

- Funkcje md4, md5, ripemd, sha-1, blake2
- Silna bezkolizyjność jest problematyczna, tylko sha-1 jest w miarę dobre
  - znaleziono dwa certyfikaty X.509 o tej samej wartości funkcji skrótu md5
  - gdyby jeden był podpisany przez wystawcę certyfikatów, to automatycznie drugi też
- Nie ma problemów ze słabą bezkolizyjnością i nieodwracalnością
  - gdyby te własności były naruszone, to duża część kryptografii byłaby w kłopotcie

## Współczesne funkcje skrótu

Podstawy kryptografii

Andrzej Borzyszkowski

Wykład 5

Integralność – definicja

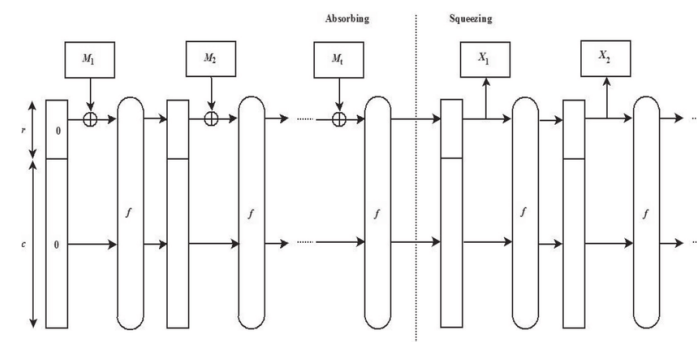
Funkcje skrótu

MAC dla ciągów dowolnej długości

SHA-1

Szyfrowanie i uwierzytelnianie

- Metoda gąbki: dana funkcja  $f : \{0, 1\}^b \rightarrow \{0, 1\}^b$ , typowe  $b = 1600$ 
  - $b = r + c$ , typowe  $c = 256, \dots, 1024$
  - wielokrotne iterowanie  $f(x_i \oplus m_{i+1}, y_i)$  – wynikiem jest ostatnia wartość  $x_k$
- klasa funkcji SHA-3 o długości 224,256,384 oraz 512 bitów



Źródło: Tiwari, Harshvardhan. (2017). Merkle-Damgård Construction Method and Alternatives: A Review. Journal of Information and Organizational Sciences. 41. 283-304. 10.31341/jios.41.2.9.

## Funkcja skrótu za pomocą szyfrowania

Podstawy kryptografii

Andrzej Borzyszkowski

Wykład 5

Integralność – definicja

Funkcje skrótu

MAC dla ciągów dowolnej długości

SHA-1

Szyfrowanie i uwierzytelnianie

- Dana funkcja szyfrująca  $E : [\ell + n] \rightarrow [n]$ ,  $n$  długość szyfrowanych bloków,  $\ell$  długość klucza
  - można przerobić ją na funkcję skrótu na wiele sposobów:  
 $h(k, m) = E(k, m) \oplus m$ , albo  $E(k, m) \oplus m \oplus k$ , albo  $E(k, k \oplus m) \oplus m$  albo ...
  - i dalej iterować użycie dla większej liczby bloków
  - jest to równoważne zastosowaniu szyfru symetrycznego w wersji blokowej i przyjęciu ostatniego bloku jako skrótu
- Możliwość ataku urodzinowego wyklucza szyfry o kluczu mniejszym niż np. 128 bitów
  - np. klasyczny DES

## Szyfrowanie za pomocą funkcji skrótu

Podstawy kryptografii

Andrzej Borzyszkowski

Wykład 5

Integralność – definicja

Funkcje skrótu

MAC dla ciągów dowolnej długości

SHA-1

Szyfrowanie i uwierzytelnianie

- Funkcja skrótu  $h$  pozwala wygenerować ciąg pseudolosowy
  - $x_0$  musi być losowe i przesłane niezależnie jako  $IV$
  - $x_j = 8$  bitów z  $h(k, x_{j-1})$ ,  $k$  jest kluczem, jest użyte jako ciąg pseudolosowy
  - tzn.  $c_j = m_j \oplus x_j$ , ciąg  $x_j$  jest dodawany do wiadomości w celu zaszyfrowania/odszyfrowania

- Dane dwa klucze, jak zapewnić poufność i integralność?
    - 1) przesłać  $Enc(k_1, m)$  oraz  $MAC(k_2, m)$
  - ale MAC może ujawnić całą wiadomość
    - a praktycznie zawsze jest deterministyczny: ŻŁE
  - 2) przesłać  $Enc(k_1, m || MAC(k_2, m))$
  - szyfr nie musi być odporny na atak z wybranym kryptogramem
    - być może nawet da się odtworzyć cały tekst jawny: ŻŁE
- PRAWIDŁOWE ROZWIĄZANIE:
- 3) przesłać  $Enc(k_1, m)$  oraz  $MAC(k_2, Enc(k_1, m))$
- uniemożliwia atak przez modyfikację kryptogramu
  - bezpieczeństwo takie same jak dla  $Enc$
  - UWAGA: MAC i  $Enc$  mogą być funkcjami wzajemnie odwrotnymi (szyfry blokowe itp), klucze muszą być różne