

# [PTKB] Kolokwium 2 - opracowanie

## 1 Kolokwium 2 z PTKB (11.01.2012)

### 1.1 Zadanie 1.

**Treść:** Ile razy trzeba wykonać protokół uwierzytelniania Fiata-Shamira by prawdopodobieństwo oszustwa było mniejsze od  $10^{-1000}$ ?

**Rozwiązanie:** Prawdopodobieństwo udanego oszustwa po wykonaniu  $n$  eksperymentów wynosi  $(\frac{1}{2})^n$ . Rozwiązujemy równanie  $(\frac{1}{2})^x = 10^{-1000}$ .

$$\begin{aligned}\left(\frac{1}{2}\right)^x &= 10^{-1000} \\ 2^x &= 10^{1000} \\ x &= \log_2 10^{1000} \\ x &= 1000 \log_2 10 \\ x &\simeq 3321.928\end{aligned}$$

Wybieramy  $\lceil x \rceil = 3322$ .

### 1.2 Zadanie 2.

**Treść:** Skonstruować system podpisów cyfrowych ElGamala „dla małych liczb”. Przyjąć odpowiedni klucz publiczny i prywatny. Podpisać dowolną wybraną wiadomość  $m$  i zweryfikować podpis.

**Rozwiązanie :**

1. Ustanawianie systemu. Wybieramy liczbę pierwszą np.  $p = 13$ . Jako generator grupy mnożymy  $Z_{13}^*$  można wybrać  $g = 2$ , ponieważ  $2^1(\text{mod}13) = 2$ ,  $2^2(\text{mod}13) = 4$ ,  $2^3(\text{mod}13) = 8$ ,  $2^4(\text{mod}13) = 3$ ,  $2^5(\text{mod}13) = 6$ ,  $2^6(\text{mod}13) = 12$ ,  $2^7(\text{mod}13) = 11$ ,  $2^8(\text{mod}13) = 9$ ,  $2^9(\text{mod}13) = 5$ ,  $2^{10}(\text{mod}13) = 10$ ,  $2^{11}(\text{mod}13) = 7$ ,  $2^{12}(\text{mod}13) = 1$ . Jako klucz prywatny wybieramy losowo dowolną liczbę  $x \in \langle 2, p-2 \rangle$ . Wybierzmy np.  $x = 3$ . Będzie to tajemnica strony podpisującej wiadomość. Ujawniamy klucz publiczny  $y = g^x(\text{mod}p) = 2^3(\text{mod}13) = 8$ .
2. Podpisywanie wiadomości (dokumentu) przez stronę dysponującą tajnym kluczem prywatnym  $x$ . Wybieramy jako wiadomość podpisywaną dowolną liczbę  $m \in Z_{p-1}$  czyli w naszym przypadku  $m \in Z_{12}$ . Wiadomość jawna  $m$  jest więc jednym z elementów zbioru  $0, 1, 2, \dots, 11$ . Wybierzmy jako wiadomość podpisywaną  $m =$

4. Mając  $m = 4$  i  $x = 3$  tworzymy teraz podpis wiadomości  $m = 4$  czyli odpowiednią parę uporządkowaną  $(a, b) \in Z_p^* \times Z_{p-1}$ . Losujemy  $k \in Z_{p-1}$  takie, że  $\text{NWD}(k, p-1) = 1$ . Niech to będzie  $k = 5$ . Obliczamy  $k^{-1}$  w pierścieniu  $Z_{p-1}$  czyli w pierścieniu  $Z_{12}$ . Łatwo sprawdzić, że  $k^{-1} = 5$ . Obliczamy  $a \in Z_p^*$  jako  $g^k(\text{mod}p)$ , mamy więc  $2^5(\text{mod}13) = 6$ . Obliczamy teraz  $b \in Z_{p-1}$  jako  $b = k^{-1} \otimes_{p-1} (m - 12x \otimes [a]_{p-1})$ . Przy przyjętych i obliczonych wartościach mamy więc  $b = 5 \otimes_{12} (4 - 12 \cdot 3 \otimes_{12} 6) = 2$ . Zatem podpis  $(a, b)$  wiadomości  $m = 4$  ma postać pary uporządkowanej  $(6, 2)$  a podpisywana wiadomość 4 z podpisem to para uporządkowana  $(4, (6, 2))$ .

3. Weryfikacja podpisu. Równanie weryfikacyjne dla podpisów ElGamala ma postać:

$$y^a \otimes_p a^b = g^m$$

gdzie podnoszenie do potęgi jest jak pierścieniu  $Z_p$ . Musimy sprawdzić dla  $y = 8$ ,  $a = 6$ ,  $b = 2$ ,  $m = 4$  i  $g = 2$  czy równanie (\*) jest spełnione.

$$\begin{aligned}L = y^a \otimes_p a^b &= 8^6 \cdot 2(\text{mod}13) = 3 \\ P = g^m &= 2^4(\text{mod}13) = 3\end{aligned}$$

Mamy więc  $L = P$  i równanie weryfikacyjne (\*) jest spełnione, zatem przedstawiony do weryfikacji podpis akceptujemy.

### 1.3 Zadanie 3.

**Treść:** Wykazać, że charakterystyka ciała skończonego (czyli najmniejsza taka liczba  $n$ , że spełniona jest równość  $\underbrace{1 + 1 + 1 + \dots + 1}_n = 0$ ) jest zawsze

liczbą pierwszą.

**Rozwiązanie:** Załóżmy, że  $\text{char} K = n$  i liczba  $n = m_1 m_2$ , gdzie  $m_1, m_2 \in \mathbb{N}$ , a więc  $n \cdot 1 = (m_1 m_2) \cdot 1 = 0$ . Z łączności dodawania i rozdzielności mnożenia względem dodawania w ciele  $K$  mamy  $(m_1 m_2) \cdot 1 = (m_1 \cdot 1)(m_2 \cdot 1)$ , zatem:

$$(m_1 \cdot 1)(m_2 \cdot 1) = 0$$

Jeśli  $m_1 < n$  to z definicji charakterystyki dostajemy, że  $m_1 \cdot 1 \neq 0$ , zatem istnieje element odwrotny  $(m_1 \cdot 1)^{-1}$  do  $m_1 \cdot 1$ . Mnożąc lewostronnie równość

$(m_1 \cdot 1)(m_2 \cdot 1) = 0$  przez  $(m_1 \cdot 1)^{-1}$  dostajemy  $m_2 \cdot 1 = 0$ , ponieważ jednak  $1 \leq m_2 \leq n$  to biorąc pod uwagę definicję charakterystyki ciała musimy mieć  $m_2 = n$ . Wynika stąd, że liczba  $n$  nie jest podzielna przez żadną liczbę różną od  $n$  i 1, a zatem jest liczbą pierwszą.

Można też rozumować nieco inaczej. Załóżmy, że  $\text{char} K = n$  i liczba  $n$  daje się przedstawić w postaci  $n = m_1 m_2$ , gdzie  $m_1, m_2 \in \mathbb{N}$  i  $m_1, m_2 \geq 2$ , czyli  $n$  nie jest liczbą pierwszą. Wówczas  $n \cdot 1 = (m_1 m_2) \cdot 1 = (m_1 \cdot 1)(m_2 \cdot 1) = 0$ . Ponieważ  $m_1 \cdot 1 \neq 0$  i  $m_2 \cdot 1 \neq 0$  oraz  $(m_1 \cdot 1)(m_2 \cdot 1) = 0$  co nie jest możliwe, bo ciało nie ma niezerowych dzielników zera. Zatem założenie, że  $n$  nie jest liczbą pierwszą prowadzi do sprzeczności.

## 1.4 Zadanie 4.

**Treść:** Podać przykład liczby pseudopierwszej przy podstawie 2 i 3 jednocześnie. Czy takie liczby w ogóle istnieją?

**Rozwiązanie:** Liczba naturalna jest liczbą Carmichaela wtedy i tylko wtedy, gdy:

1. Jest liczbą złożoną.
2. Dla każdego  $a \in \mathbb{N}$  z przedziału  $1 < a < n$ , względnie pierwszej z  $n$ , liczba  $(a^{n-1} - 1)$  jest podzielna przez  $n$ .

Patrząc na najmniejsze liczby Carmichaela:

$$\begin{aligned} 561 &= 3 \cdot 11 \cdot 17 \\ 1105 &= 5 \cdot 13 \cdot 17 \end{aligned}$$

widzimy, że liczba Carmichaela 1105 jest względnie pierwsza zarówno z 2, jak również 3. Liczba 1105 jest więc pseudopierwsza jednocześnie przy podstawie 2 oraz 3.

## 1.5 Zadanie 5.

**Treść:** Podać przykład ciała  $GF(3^2)$ , czyli ciała o 9 elementach.

**Rozwiązanie:** Ciało  $GF(p^n)$ , gdzie  $p$  jest liczbą pierwszą oraz  $n \in \mathbb{N}$ , można wygenerować:

- Znajdując wielomian  $f(x)$  stopnia  $n$  nierozkładalny w pierścieniu  $GF(p)[x]$ .
- Znajdując wszystkie możliwe reszty z dzielenia wielomianu  $f(x)$  w pierścieniu  $GF(p)[x]$ .
- Wykorzystując działania dodawania i mnożenia wielomianów modulo  $f(x)$ .

Wielomianem drugiego stopnia nierozkładalnym w ciele  $G(3)[x]$  jest  $x^2 + 1$  (patrz: *Zadanie 7*). Wszystkie możliwe reszty z dzielenia tego wielomianu w pierścieniu  $G(3)[x]$  to:  $2x+2$ ,  $2x+1$ ,  $2x$ ,  $x+2$ ,  $x+1$ ,  $x$ ,  $2$ ,  $1$ .

## 1.6 Zadanie 6.

**Treść:** Podać przykład szyfru Rabina „dla małych liczb”. Podać przykład szyfrowania i deszyfracji.

**Rozwiązanie:** Generacja pary kluczy przebiega następująco:

- Wybieramy dwie liczby pierwsze  $p$  i  $q$ . Dla uproszczenia można wybrać liczby, które spełniają warunek  $p \equiv q \equiv 3 \pmod{4}$ .
- Obliczamy klucz publiczny  $n = p \cdot q$ .

Żeby zaszyfrować wiadomość potrzebny jest wyłącznie klucz publiczny  $n$ . Żeby odczytać wiadomość potrzebny jest również rozkład klucza na czynniki pierwsze  $p$  i  $q$ . Przykładowe wartości „dla małych liczb” -  $p = 7$ ,  $q = 11$ ,  $n = 77$ .

Szyfrowanie wiadomości  $m \in P = \{0, \dots, n-1\}$  polega na obliczeniu szyfrogramu  $c = m^2 \pmod{n}$ . Przykładowo, chcąc zakodować wiadomość  $m = 20$ , obliczamy  $c = 20^2 \pmod{77} = 400 \pmod{77} = 15$ . Niestety, szyfrowanie nie jest jednoznaczne, ponieważ ten sam szyfrogram uzyskujemy dla czterech różnych wiadomości  $m \in \{13, 20, 57, 64\}$ .

Deszyfrowanie wiadomości wymaga obliczenia pierwiastków kwadratowych ze względu na obie części klucza prywatnego  $p$  i  $q$ .

$$\begin{aligned} m_p &= \sqrt{c} \pmod{p} \\ m_q &= \sqrt{c} \pmod{q} \end{aligned}$$

Dla przykładowych małych liczb otrzymujemy  $m_p = 1$  oraz  $m_q = 9$ . Następnie, używając rozszerzonego algorytmu Euklidesa, odnajdujemy  $y_p$  oraz  $y_q$  takie, że  $y_p \cdot p + y_q \cdot q = 1$ . Dla przykładowych danych  $y_p = -3$  oraz  $y_q = 2$ . Teraz, korzystając z chińskiego twierdzenia o resztach, odnajdujemy cztery pierwiastki  $(+r, -r, +s \text{ oraz } -s)$  równania  $c + n\mathbb{Z} \in \mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ :

$$\begin{aligned} r &= (y_p \cdot p \cdot m_q + y_q \cdot q \cdot m_p) \pmod{n} \\ -r &= n - r \\ s &= (y_p \cdot p \cdot m_q - y_q \cdot q \cdot m_p) \pmod{n} \\ -s &= n - s \end{aligned}$$

Dla naszego przykładu pierwiastki tego równania przyjmują wartości  $m \in \{64, 20, 13, 57\}$ . Wśród nich jest zakodowana wiadomość  $m = 20$ .

## 1.7 Zadanie 7.

**Treść:** Wykazać, że wielomian  $x^2 + 1$  jest nierozkładalny w pierścieniu wielomianów  $GF(3)[x]$ , a jest rozkładalny w pierścieniu wielomianów  $GF(2)[x]$ .

**Rozwiązanie:** Wielomian drugiego stopnia można rozłożyć za pomocą dwóch wielomianów pierwszego stopnia, więc:

$$\begin{aligned}x^2 + 1 &= (ax + b) * (cx + d) \\x^2 + 1 &= (ac)x^2 + (ad + bc)x + bd\end{aligned}$$

Dla ciała  $GF(3)[x]$  mamy:  $a, b, c, d \in \{0, 1, 2\}$ . Aby otrzymać wielomian  $x^2 + 1$ , muszą być spełnione warunki:  $ac \equiv 1 \pmod{3}$ ,  $bd \equiv 1 \pmod{3}$ . Zatem  $a = b = c = d = 1$ , co daje wielomian  $x^2 + 2x + 1$ , a nie  $x^2 + 1$ .

Dla ciała  $GF(2)[x]$ ,  $b, d \in \{0, 1\}$  oraz  $a, c \in \{1\}$ . Jeżeli  $(b + d) \equiv 0 \pmod{2} \Rightarrow (b = 0 \wedge d = 0) \vee (b = 1 \wedge d = 1)$ . Dla drugiego przypadku otrzymujemy w  $GF(2)[x]$ :

$$x^2 + 1 \equiv (x + 1) * (x + 1)$$

Zatem wielomian jest rozkładalny.

## 1.8 Zadanie 8.

**Treść:** Wykazać, że w grupie skończonej dla każdego  $a \in G$  mamy:  $a^{rzG} = 1$ , gdzie  $rzG$  oznacza rząd grupy  $G$ . Wykazać, wykorzystując ten fakt, twierdzenie Eulera. (Wskazówka: wykorzystać twierdzenie Lagrange'a: dla grup skończonych rząd podgrupy jest dzielnikiem rzędu grupy).

**Rozwiązanie:** W ciągu  $a^1, a^2, \dots, a^{rzG}, a^{rzG+1}$  muszą być dwa elementy równe, tzn. dla pewnych  $k', k'' \in [1, rzG + 1]$ ,  $k' < k''$  musimy mieć  $a^{k'} = a^{k''}$ . Zatem  $a^{k''-k'} = 1$ . Istnieje więc takie  $k \in [1, rzG]$  ( $k = k'' - k'$ ), że  $a^k = 1$ . Niech  $r$  będzie najmniejszym takim  $k$ , że  $a^k = 1$ , wówczas zbiór  $H = \{a^1, a^2, \dots, a^r\}$  stanowi podgrupę cykliczną rzędu  $r$  grupy  $G$ . Ponieważ, z twierdzenia Lagrange'a,  $r$  jest dzielnikiem rzędu grupy  $G$ , więc również  $a^{rzG} = 1$ .

Twierdzenie Eulera: jeśli  $n \in \mathbb{N}$ ,  $n \geq 2$  i  $a \in \mathbb{N}$  oraz  $NWD(a, n) = 1$  to  $a^{\phi(n)} \equiv 1 \pmod{n}$ , gdzie  $\phi$  jest funkcją Eulera. Rozważmy grupę multiplikatywną  $Z_n^*$ . Grupa  $Z_n^*$  ma rząd równy  $\phi(n)$ . Zatem korzystając z  $a^{rzG} = 1$  dostajemy, że dla każdego  $a \in Z_n^*$  mamy  $a^{\phi(n)} \equiv 1 \pmod{n}$ . Warunek  $a \in Z_n^*$  jest równoznaczny warunkowi  $NWD(a, n) = 1$ . Zatem twierdzenie Eulera jest prostym wnioskiem z ogólnego twierdzenia teoriogrupowego  $a^{rzG} = 1$ .

## 1.9 Zadanie 9.

**Treść:** Mamy zapis RNS z modułami  $m_1 = 5$ ,  $m_2 = 7$ ,  $m_3 = 11$ ,  $m_4 = 13$ , za pomocą którego zapisujemy liczby całkowite ze zbioru  $[0, m_1 \cdot m_2 \cdot m_3 \cdot m_4 - 1]$ . Dodać i pomnożyć dwie liczby  $a = (3, 5, 9, 11)$  oraz  $b = (1, 3, 7, 9)$  stosując typowy dla RNS algorytm. Czy uzyskane wyniki są poprawne?

**Rozwiązanie:** W RNS można wykonywać operację mnożenia i dodawania według poniższego algorytmu, dla każdego elementu z bazy:

$$\begin{aligned}\forall i \in M \quad a_i \pm b_i &\pmod{m_i} \\ \forall i \in M \quad a_i \cdot b_i &\pmod{m_i}\end{aligned}$$

Zatem:

$$\begin{aligned}(a + b) &= (3 + 1 \pmod{5}, 5 + 3 \pmod{7}, \\ &\quad 9 + 7 \pmod{11}, 11 + 9 \pmod{13}) = \\ &= (4, 1, 5, 7)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}(a \cdot b) &= (3 \cdot 1 \pmod{5}, 5 \cdot 3 \pmod{7}, \\ &\quad 9 \cdot 7 \pmod{11}, 11 \cdot 9 \pmod{13}) = \\ &= (3, 1, 8, 8)\end{aligned}$$

Aby sprawdzić poprawność tego rozwiązania, musimy wyznaczyć liczby  $a$  oraz  $b$ . Zapis RNS przedstawia liczby w postaci układu kongruencji w modulo bazy, a więc:

$$\begin{aligned}a &\equiv 3 \pmod{5} \\ a &\equiv 5 \pmod{7} \\ a &\equiv 9 \pmod{11} \\ a &\equiv 11 \pmod{13}\end{aligned}$$

Układ ten można sprowadzić do  $a \equiv -2 \pmod{5005}$ . Analogicznie dla  $b$ :

$$\begin{aligned}b &\equiv 1 \pmod{5} \\ b &\equiv 3 \pmod{7} \\ b &\equiv 7 \pmod{11} \\ b &\equiv 9 \pmod{13}\end{aligned}$$

Układ ten można sprowadzić do  $b \equiv -4 \pmod{5005}$ . Wyznamy sumę  $a + b$ .

$$a + b \equiv -6 \pmod{5005}$$

Wyznamy iloczyn  $a \cdot b$ .

$$a \cdot b \equiv 8 \pmod{5005}$$

Teraz sprawdzimy poprawność wyników uzyskanych przez algorytmy dodawania i mnożenia w RNS. Dodawanie:

$$\begin{aligned}-6 &\equiv 4 \pmod{5} \\ -6 &\equiv 1 \pmod{7} \\ -6 &\equiv 5 \pmod{11} \\ -6 &\equiv 7 \pmod{13}\end{aligned}$$

Czyli uzyskaliśmy te same współczynniki. Teraz sprawdzamy poprawność mnożenia:

$$\begin{aligned}8 &\equiv 3 \pmod{5} \\ 8 &\equiv 1 \pmod{7} \\ 8 &\equiv 8 \pmod{11} \\ 8 &\equiv 8 \pmod{13}\end{aligned}$$

Czyli wykorzystane algorytmy dodawania i mnożenia dały poprawne rezultaty.

## 1.10 Zadanie 10.

**Treść:** Załóżmy, że mamy dwie niezależne zmienne losowe  $X_1$  oraz  $X_2$  o wartościach w zbiorze  $Z_2 = \{0, 1\}$ . Wykazać, że jeśli  $X_1$  ma rozkład równomierny, to również  $X_1 \oplus X_2$  ma rozkład równomierny. Ten fakt jest podstawą protokołu o nazwie „rzut monetą przez telefon”.

**Rozwiązanie:** Najpierw wykażemy, że odwzorowanie  $Y = X_1 \oplus X_2$  jest zmienną losową. Ogólnie rzecz biorąc, jeśli  $(\Omega, \mathfrak{M})$  jest przestrzenią mierzalną,  $(E_t, \mathfrak{F}_t)_{t \in T}$  jest dowolną rodziną przestrzeni mierzalnych, a odwzorowania  $f_t : \Omega \rightarrow E_t$  są  $(\mathfrak{M}, \mathfrak{F}_t)$  mierzalne dla każdego  $t \in T$  to odwzorowanie  $\prod_{t \in T} f_t : \Omega \rightarrow \prod_{t \in T} E_t$  jest  $(\mathfrak{M}, \prod_{t \in T} \mathfrak{F}_t)$  mierzalne. Stosując ten ogólny fakt do naszej sytuacji stwierdzamy, że odwzorowanie  $(X_1, X_2)$  jest  $(\mathfrak{M}, 2^{\{0,1\}} \otimes 2^{\{0,1\}})$  mierzalne. Odwzorowanie  $S : \{0, 1\} \times \{0, 1\} \ni (x_1, x_2) \rightarrow x_1 \oplus x_2 \in \{0, 1\}$  jest oczywiście  $(2^{\{0,1\}} \otimes 2^{\{0,1\}}, 2^{\{0,1\}})$  mierzalne, zatem  $Y = X_1 \oplus X_2$  jako superpozycja odwzorowań mierzalnych  $(X_1, X_2)$  i  $S$  jest  $(\mathfrak{M}, 2^{\{0,1\}})$  mierzalne, jest więc zmienną losową.

Udowodnimy teraz równomierność rozkładu zmiennej losowej  $Y = X_1 \oplus X_2$ . Oznaczmy:

$$\begin{aligned} A_0 &= \{\omega \in \Omega; X_1(\omega) = 0, X_2(\omega) = 0\}, \\ A_1 &= \{\omega \in \Omega; X_1(\omega) = 1, X_2(\omega) = 0\}, \\ B_0 &= \{\omega \in \Omega; X_1(\omega) = 1, X_2(\omega) = 1\}, \\ B_1 &= \{\omega \in \Omega; X_1(\omega) = 0, X_2(\omega) = 1\}. \end{aligned}$$

Wówczas zdarzenia  $A_0, A_1, B_0, B_1$  są parami rozłączne. Stąd i z niezależności zmiennych losowych  $X_1$  i  $X_2$  oznaczając  $P(X_1 = 0) = p_0, P(X_1 = 1) = p_1$  dostajemy:

$$\begin{aligned} P(Y = 1) &= P(A_1 \cup B_1) = P(A_1) + P(B_1) = \\ &= P(X_1 = 1) \cdot P(X_2 = 0) + \\ &+ P(X_1 = 0) \cdot P(X_2 = 1) = \\ &= p_1 \cdot \frac{1}{2} + p_2 \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{2} \end{aligned}$$

ponieważ  $p_0 + p_1 = 1$ . Podobnie:

$$\begin{aligned} P(Y = 0) &= P(A_0 \cup B_0) = P(A_0) + P(B_0) = \\ &= P(X_1 = 0) \cdot P(X_2 = 0) + \\ &+ P(X_1 = 1) \cdot P(X_2 = 1) = \\ &= p_1 \cdot \frac{1}{2} + p_2 \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{2} \end{aligned}$$

a więc istotnie zmienna losowa  $Y = X_1 \oplus X_2$  ma rozkład równomierny.

## 2 Zadania przygotowujące do kolokwium #2 z PTKB

### 2.1 Zadanie 2.

**Treść:** Ile razy trzeba wykonać protokół uwierzytelniania Fiata-Shamira by prawdopodobieństwo oszustwa było mniejsze od  $10^{-100}$ .

**Rozwiązanie:** Patrz 1.1

### 2.2 Zadanie 3.

**Treść:** Pokazać jak musi sprepować protokół Fiata-Shamira Prover nie znający tajemnicy (a więc oszust lub zapominalski) by zawsze na wyzwanie  $e = 1$  odpowiadać prawidłowo.

**Rozwiązanie:**

1. Prover nie znający tajemnicy s prawdziwego Provera (czyli nie znający klucza prywatnego) losuje liczbę  $r \in Z_n, r \neq 0, 1$ . Podnosi do kwadratu modulo  $n$  (przypominamy, że  $n = pq$ , gdzie  $p, q$  są różnymi liczbami pierwszymi) i przesyła w pierwszym kroku protokołu do Verifiera liczbę  $x = (r^2(\text{mod } n)(s^2(\text{mod } n))^{-1})(\text{mod } n)$ , gdzie  $s \in Z_n$  jest tajemnicą (kluczem prywatnym) prawdziwego Provera,  $s^2(\text{mod } n) \in Z$ , kluczem publicznym a odwrotność jest  $n$  brana w pierścieniu  $Z_n$ .
2. Jeśli Verifier żąda w drugim kroku protokołu odpowiedzi na pytanie  $e = 1$  to Prover wysyła do Verifiera liczbę  $y = r$
3. Verifier sprawdza teraz równanie weryfikacyjne sprawdzając czy:

$$y^2(\text{mod } n) = (x * s^2)(\text{mod } n)$$

Równanie to jest dla  $y = r$  i  $x = (r^2(\text{mod } n)(s^2(\text{mod } n))^{-1})(\text{mod } n)$  Proverowi udało się dobrze odpowiedzieć na pytanie  $e = 1$  Verifiera.

### 2.3 Zadanie 9.

**Treść:** Niech  $G$  będzie skończoną grupą cykliczną rzędu  $n$ , a  $g \in G$  generatorem tej grupy. Pokazać, że dla każdego  $d \in \mathbb{N}$   $g^d$  jest generatorem grupy  $G$  wtedy i tylko wtedy, gdy  $\text{NWD}(d, n) = 1$ .

**Rozwiązanie:** 1. Wynikanie w lewo. Niech  $\text{NWD}(d, n) = 1$ . Jeśli  $(g^d)^{r_1} = (g^d)^{r_2}$  dla pewnych  $r_1, r_2 \in \mathbb{N}$  to  $g^{d(r_1 - r_2)} = 1$ . Z uwagi na fakt, że  $g$  jest generatorem grupy  $G$  musimy mieć  $d(r_1 - r_2) \equiv 0(\text{mod } n)$  co oznacza, że  $d(r_1 - r_2)$  jest wielokrotnością  $n$ . Wynika stąd, że jeśli  $r_1, r_2 \in [1, n]$  to

$r_1 = r_2$ . Kolejne potęgi  $(g^d)^r$  dla  $r = 1, 2, \dots, n$  są więc parami różne, co dowodzi faktu, że  $g^d$  jest generatorem.

2. Wynikanie w prawo. Niech  $\text{NWD}(d, n) = r > 1$ , wówczas istnieją takie  $k_1, k_2 \in \mathbb{N}$ , że  $n = k_1 \cdot r$  oraz  $d = k_2 \cdot r$ . Oczywiście, ponieważ  $r > 1$  musimy mieć  $k_1 < n$ . Zatem  $(g^d)^{k_1} = (g^{k_2 \cdot r})^{k_1} = (g^{k_1 \cdot r})^{k_2} = (g^n)^{k_2} = 1$ . Stąd wynika, że rząd elementu  $g^d$  jest co najwyżej równy  $k_1$ , a więc jest mniejszy od  $n$ , a więc  $g^d$  nie jest generatorem grupy  $G$ .

## 2.4 Zadanie 11.

**Treść:** Niech  $GF(2^k)[x]$  będzie pierścieniem wielomianów o współczynnikach w ciele  $GF(2^k)$ . Wykazać, że dla każdego wielomianu  $x^n$  (gdzie  $n \in \mathbb{N}$ ) z pierścienia  $GF(2^k)[x]$  mamy:

$$x^n(\text{mod}(x^4 + 1)) = x^{n(\text{mod}4)}$$

**Rozwiązanie:** 1. W ciele  $Z_2 = \{0, 1\}$  dodawanie jest zwykłą sumą modulo 2 (oznaczaną symbolem  $\oplus$ ). Również odejmowanie w  $Z_2$  jest sumą modulo 2, bo mamy  $1 \oplus 1 = 0$  i  $0 \oplus 0 = 0$ , więc  $-a = a$  dla  $a \in Z_2$  oraz  $a -_2 b = a \oplus b$  dla  $a, b \in Z_2$ , gdzie  $-_2$  jest odejmowaniem modulo 2 w  $Z_2$ .

2. W ciele  $GF(2^k)$ , którego elementami są słowa binarne o długości  $k$ , definiujemy działanie dodawania standardowo jako sumę wielomianów. W naszej sytuacji jest to jednocześnie suma modulo 2 po współrzędnych, tzn. jeśli  $a = (a_1, a_2, \dots, a_k) \in GF(2^k)$ , gdzie  $a_i \in \{0, 1\}$  oraz  $b = (b_1, b_2, \dots, b_k) \in GF(2^k)$ , gdzie  $b_i \in \{0, 1\}$  to:

$$a + b = (a_1 \oplus b_1, a_2 \oplus b_2, \dots, a_k \oplus b_k)$$

oraz:

$$\begin{aligned} a -_2 b &= (a_1 -_2 b_1, a_2 -_2 b_2, \dots, a_k -_2 b_k) = \\ &= (a_1 \oplus b_1, a_2 \oplus b_2, \dots, a_k \oplus b_k) \end{aligned}$$

Dla  $n < 4$  wzór jest zawsze prawdziwy (przypadek trywialny). Dla  $n \geq 4$  istnieje takie  $q \in \mathbb{N}$ , że  $n = q \cdot 4 + r$  i  $0 \leq r < 4$ , gdzie  $r = n(\text{mod}4)$ . Zauważmy jak przebiega dzielenie wielomianu  $x^n$  dla  $n \geq 4$ . Uwzględniając, że w ciele modulo 2 operacje dodawania i odejmowania są tożsame, mamy:

$$\begin{array}{r} x^{n-4} + x^{n-8} + \dots + x^{n-q \cdot 4} \\ \hline x^n \\ x^n + x^{n-4} \\ \hline x^{n-4} \\ x^{n-4} + x^{n-8} \\ \hline \dots \\ \hline x^r \end{array} : x^4 + 1$$

z czego wynika, że  $x^n(\text{mod}(x^4 + 1)) = x^{n(\text{mod}4)}$ .

## 2.5 Zadanie 33.

**Treść:** Obliczyć wartość symbolu Legendre'a: a)  $(\frac{35}{7})$  b)  $(\frac{64}{5})$

**Rozwiązanie:**

$$1. \quad \left(\frac{35}{7}\right) = \left(\frac{5}{7}\right)\left(\frac{7}{7}\right) = 0$$

$$2. \quad \left(\frac{64}{5}\right) = \left(\frac{4}{5}\right) = \left(\frac{2 \cdot 2}{5}\right) = 1$$

Symbol Legendre'a to funkcja  $\left(\frac{a}{p}\right)$  ( $p$  musi być liczbą pierwszą większą od 2) zwracająca:

0, jeśli  $a$  jest wielokrotnością  $p$

1, jeśli istnieje takie  $b$ , że  $b^2 = a \pmod{p}$

-1, jeśli nie istnieje żadne  $b$ , żeby  $b^2 = a \pmod{p}$

## 2.6 Zadanie 10.

**Rozwiązanie:** Patrz 1.10