

PASYWNE POZYSKIWANIE ENERGII

Jolanta GINTOWT

Politechnika Krakowska, Zakład budownictwa Ogólnego i Przemysłowego
Ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, e-mail: jolanta.gintowt@interia.pl

Streszczenie: Analizowano wartość zysków energii dla pasywnego systemu słonecznego w postaci przegrody pionowej i poziomej w budynku jednorodzinym oraz porównano wynik z tym samym budynkiem ale bez pasywnego pozyskania energii. Porównano wyniki zysków energetycznych obliczonych dla promieniowania słonecznego przyjętego jako wartość średnia w ciągu dnia i jako wartość godzinowa.

Słowa kluczowe: pasywny system słoneczny, promieniowanie słoneczne.

1. OGÓLNA PREZENTACJA METOD OBLICZENIOWYCH BIERNYCH SYSTEMÓW SŁONECZNYCH

Wyróżnić można dwie grupy obliczeń: sumaryczną i symulacyjną. Sumaryczne metody oparte są na zasadach stacjonarnego przepływu ciepła w całym rozpatrywanym okresie i wykorzystują w obliczeniach średnie wartości temperatur, promieniowania słonecznego oraz czasu nasłonecznienia. Metody symulacyjne dają możliwość obliczeń, dla określonego przedziału czasu, np. temperatury, w oparciu o miarodajne dane klimatyczne. W praktyce przeprowadza się obliczenia w odstępach czasowych dających żadaną dokładność wyników lub pokrywających się z częstotścią danych.

1.1. Metody symulacyjne

Metody te pozwalają na dokładne określenie amplitudy wahań temperatury we wnętrzu pomieszczenia, a więc umożliwiają określenie chwilowego przegrzania lub schłodzenia zarówno w ciągu dnia jak i w cyklu dobowym. Dla tych metod charakterystyczna jest metoda różnic skończonych. Polega na utworzeniu modelu obliczeniowego układu w postaci siatki węzłów, pomiędzy którymi następuje chwilowo stacjonarny przepływ ciepła. Tworzy się układ równań bilansujących, oddzielnie dla każdego węzła, strumienia wpływającego i wypływające

go, akumulację w pojemności cieplnej węzła oraz promieniowanie słoneczne[2]. Podstawowe równanie metody ma postać:

$$(T_n^{t+1} - T_n^t) \cdot P_n = C_{n,n+1}(T_{n+1}^{t+1} - T_n^{t+1}) + C_{n,n-1}(T_{n-1}^{t+1} - T_n^{t+1}) \quad (1)$$

gdzie;

$T_n^t, T_n^{t+1}, T_n^{t-1}$ - odpowiednio temperatury w węźle n w chwili czasowej $t, t+1, t-1$,

$C_{n,n+1}, C_{n,n-1}$ - odpowiednio wielkość wymiany ciepła między punktami $n, n+1, n-1$,

P_n - pojemność cieplna węzła. [W h/K]

Po uwzględnieniu otrzymywanej przez węzeł energii promieniowania słonecznego i energii traconej z węzła do powietrza zewnętrznego oraz w ogólnym zapisie dla siatki N -węzłowej, równania mają uporządkowaną postać:

$$\sum_{i=1}^w B_{ni} \cdot T_i^{t+1} = D_n, n = 1 - N \quad (2)$$

$$B_{ni} = \frac{P_n}{\Delta t} + \sum_{i=1}^N c_{ni} + c_{na}, i = n$$

$$B_{ni} = -c_{ni}, i = n \quad (3)$$

$$D_n = \frac{P_n}{\Delta t} \cdot T_n^t + c_{na} \cdot T_a + J_s \cdot F \cdot \tau \cdot \alpha_n$$

gdzie:

T_n - temperatura węzła n [$^{\circ}\text{C}$],

T_a - temperatura powietrza zewnętrznego [$^{\circ}\text{C}$],

C_{ni} - wymiana ciepła między węzłami n oraz i [W/ $^{\circ}\text{C}$],

P_n - pojemność węzła n [Wh/K],

J_s - natężenie promieniowania słonecznego [W/ m^2],

F - powierzchnia węzła [m^2],

τ - współczynnik przepuszczania promieniowania dla oszklenia.

Otrzymuje się układ N równań liniowych o N niewiadomych, którego rozwiązaniem jest zbiór wartości temperatury węzłów siatki w danej chwili. W następnym kroku czasowym staje się on podstawą do obliczeń nowej temperatury chwilowej T_n^{t+1} itd. Węzłem może być powietrze wewnętrzne i meble. Liczba węzłów jest teoretycznie nieograniczona. Wprowadzenie niewielkiej zmiany w układzie (np. pojemności cieplnej przegród, usytuowania przegród) pozwala określić efekty energetyczne całego systemu. Mimo uproszczeń teoretycznych (dotyczących wymiany ciepła – warunki stacjonarne) umożliwia dość dobrą ocenę rozwiązań oraz łatwe określenie parametrów optymalnych.

1.2. Metody sumaryczne

Metoda przewidywanej sprawności opiera się na odczytanej z nomogramu wartości sprawności P (będącej funkcją dwóch parametrów: izolacyjności cieplnej budynku i wielkością systemów słonecznych) i zysk energii cieplnej wyraża się zależnością [4]

$$HG = F \cdot J \cdot P \quad (4)$$

gdzie:

HG - zysk cieplny

F – powierzchnia przeszklenia netto [m²]

J- natężenie promieniowania słonecznego jako f(t)

t – czas [h].

Metoda SLR– „solar load ratio” stosunek ilości promieniowania słonecznego Q_t , przenikającego do wnętrza przez przeszklenie A_c , do zapotrzebowania cieplnego L. Służy do przewidywania, rozłożonej w dłuższym czasie, termicznej charakterystyki wydajności pasywnego systemu słonecznego. W metodzie tej należy określić funkcję zmienności (rozkładu) częstości występowania różnych wartości słonecznych. Podkreślić trzeba, że metoda ta nie jest ściśle obowiązująca dla podobnych budynków (ze względu na różne lokalizacje a tym samym różny rozkład gęstości promieniowania słonecznego). Zgodność tej metody z publikowanymi metodami numerycznymi symulacyjnymi jest zadowalająca [1].

2. ZAŁOŻENIA METODY SLR

Budynek traktuje się jako układ węzłów termicznych, dla których równania bilansujące określają wymianę ciepła i bezpośrednie magazynowanie ciepła [5].

SHF – „solar heating fraction”- określana jest zależnością, w której Q_u zależy od stanu poprzedniego czyli od energii nagromadzonej w dniach poprzednich.

$$SHF = \frac{Q_u}{Lt} = \frac{1}{Lt} \int_0^t qu(t') dt' \quad (5)$$

gdzie:

Q_u – wykorzystany zysk słoneczny , w czasie t [J],

Lt – całkowite zapotrzebowanie cieplne w czasie t [J].

Q_u - Energia dostarczana przez pasywny system słoneczny jest funkcją energii dostarczonej przez Słońce i akumulowanej w ciągu dnia słonecznego i energii nagromadzonej w dniach poprzednich. Tak więc SHF opisane jako f(ρ):

$$SHF = \frac{Ld}{L} \left[\int_{SLR_{min,d}}^{\infty} \rho(x) dx + \int_0^{SLR_{min,d}} \rho(x) \cdot SHF_D^{(0)}(x) dx \right] + \quad (6)$$

$$+ \frac{Ln}{L} \left[\int_{SLR_{min,n}}^{\infty} \rho(x) dx + \int_0^{SLR_{min,n}} \rho(x) \cdot SHF_N^{(0)}(x) dx \right]$$

Aby obliczyć wartość SHF (wzór 6) należy podać funkcję o znormalizowanym rozkładzie $\rho(SLR)$, która podaje prawdopodobieństwo pojawiania się każdej wartości SLR. Wartości promieniowania słonecznego aproksymuje się funkcjami symetrycznymi. Najbliższe rzeczywistości są rozkłady funkcja paraboliczną, której maksimum prawie pokrywa się z przeciętną wartością SLR (czyli \overline{SLR}), która oscyluje w granicach $SLR \pm \delta$. Dla zadanej lokalizacji gęstość rozkładu podaje wzór 7.

$$\rho(SLR) = \begin{cases} 0 & 0 < SLR < \overline{SLR} - \delta \\ \frac{3^2 - (SLR - \overline{SLR})^2}{4} & \overline{SLR} - \delta < SLR < \overline{SLR} + \delta \\ 0 & SLR > \overline{SLR} + \delta \end{cases} \quad (7)$$

Zależność Między SHF a SLR podaje wzór 8.

$$SHF = c_0 \cdot SLR \quad (8)$$

gdzie:

c_0 – parametr =f(danych klimatycznych, cieplnych charakterystyk budynku).

$$c_0^d = \frac{\overline{L}}{Ld} \left[1 - \frac{\left[(1-F) \cdot \tau \cdot (1 - e^{-\frac{-\Delta t^d}{\tau}}) \cdot (1 - e^{-\frac{-\Delta t^n}{\tau}}) \right]}{\Delta t^d \cdot (1 - e^{-\frac{-(\Delta t^d + \Delta t^n)}{\tau}})} \right] \quad (8)$$

$$c_0^n = \frac{\overline{L}}{Ln} \left[\frac{(1-F) \cdot \tau \cdot (1 - e^{-\frac{-\Delta t^d}{\tau}}) \cdot (1 - e^{-\frac{-\Delta t^n}{\tau}})}{\Delta t^d \cdot (1 - e^{-\frac{-(\Delta t^d + \Delta t^n)}{\tau}})} \right]$$

$SLR_{min,d}$, $SLR_{min,n}$ – odpowiednio dzienna i nocna wartość SLR ,powyżej której wystąpią nadwyżki energii. $SHF_D^{(0)}$ - wartość dziennych zysków oczekiwana, bez nadwyżek energii, $SHF_N^{(0)}$ - wartość nocnych zysków oczekiwana, bez nadwyżek energii, zakumulowana w ciągu dnia.

$$\frac{SHF_D^{(0)}}{SLR_{\min,d}} = 1 \quad \frac{SHF_N^{(0)}}{SLR_{\min,n}} = 1 \quad (9)$$

Każda nadwyżka energii usuwana jest przez wentylację. Przeciętna wartość SLR dla przyjętej podstawy czasu opisana jest wzorem 10.

$$\overline{SLR} = \frac{Q_T \cdot A_c}{L_t} \quad (10)$$

gdzie:

Q_T - promieniowanie słoneczne,
 A_c - powierzchnia kolektora [m^2],
 L_t - zapotrzebowanie na ciepło [J].

Równanie bilansu cieplnego dla kolektora -wzór 11.

$$\frac{(mC)_s \cdot dT_s^d}{dt^d} = \frac{(1-F) \cdot Q_T}{\Delta t^d} - U_{SA} \cdot (T_s^d - T_c) \quad (11)$$

gdzie:

$$T_s^d(t^d) - T_c = \left[\frac{(1-F) \cdot Q_T \cdot (1 - e^{-\frac{t^d}{\tau}})}{U_{SA} \cdot \Delta t^d} \right] \cdot (T_s(0) - T_c) \cdot e^{-\frac{t^d}{\tau}} \quad (12)$$

$$T_s^n(t^n) - T_c = \left[\frac{(1-F) \cdot Q_T \cdot (1 - e^{-\frac{t^d}{\tau}})}{U_{SA} \cdot \Delta t^d} \right] + (T_s(0) - T_c) \cdot e^{-\frac{t^d}{\tau}} \cdot e^{-\frac{t^n}{\tau}}$$

gdzie:

F - część insolacji, która nie jest bezpośrednio akumulowana przez kolektor,

U_{SA} - współczynnik przenikania ciepła z magazynu ciepła do pomieszczenia [$W/(m^2K)$],

τ czas oddawania ciepła z magazynu do wnętrza, [h] według wzoru 13

$$\tau = (mC)_s / (U_{SA} \cdot A_s) \quad (13)$$

$$T_s(0) = T_s^d$$

gdzie: T_o - wartość temperatury na początku dnia [$^{\circ}C$].

Energia nagromadzona w ciągu dnia przez powietrze pomieszczenia Q_{d1} i w ciągu nocy Q_{d2} w ciągu doby według wzoru 14:

$$Q_{d1} = F \cdot Q_T + \int_0^{\Delta t^d} U_{SA} \cdot (T_s^d(t^d) - T_c) dt^d \quad (14)$$

$$Q_{n1} = \int_0^{\Delta t^n} U_{SA} \cdot (T_s^n(t^n) - T_c) dt^n$$

FQ_T - część promieniowania słonecznego, która jest absorbowana bezpośrednio przez powietrze pomieszczenia podczas dnia.

Podstawiając zależność T_c do wzoru jw. widać, że zawierają dwa człony. Pierwszy określa część energii, która zostaje oddana (użyteczna) tego samego dnia. Drugi człon określa część energii, która została nagromadzona w dniach poprzednich i która zostaje oddana tego samego dnia. Należy rozważyć, jaka część całkowitej energii Q_T jest rozdzielona między dniem i nocą. Energia zgromadzona w kolektorze, ale nie oddana tego samego dnia ma postać:

$$Q_R = \frac{(1-F) \cdot Q_T \cdot \tau \cdot e^{-\frac{-\Delta t}{\tau}} \cdot (1 - e^{-\frac{-\Delta t}{\tau}})}{\Delta t^d} \quad (15)$$

Tak więc energia wykorzystana w ciągu dnia i nocy odpowiednio:

$$Q_d = Q_T \left[1 - \frac{(1-F) \cdot \tau \cdot (1 - e^{-\frac{-\Delta t^d}{\tau}}) \cdot (1 - e^{-\frac{-\Delta t^n}{\tau}})}{\Delta t^d \cdot (1 - e^{-\frac{-(\Delta t^d + \Delta t^n)}{\tau}})} \right] \quad (16)$$

$$Q_n = Q_T - Q_d$$

Wynik końcowy obliczamy wg kompletu wzorów poniżej

$$Q = \frac{L_t}{1 - SHF} \quad (17)$$

$$SHF = \frac{L_d}{L} \cdot SHF^d + \frac{L_n}{L} \cdot SHF^n$$

$$SHF^d = \begin{cases} c_0^d \cdot \overline{SLR} \\ 1 + \frac{(1 - c_0^d \cdot \overline{SLR} + c_0^d \cdot \delta)^3 \cdot (1 - c_0^d \cdot \overline{SLR} - 3c_0^d \cdot \delta)}{16(c_0^d \cdot \delta)^3} \\ 1 \end{cases}$$

$$\begin{aligned} SLR_{\min,d} &> \overline{SLR} + \delta \\ \overline{SLR} + \delta &\geq SLR_{\min,d} \geq \overline{SLR} - \delta \\ SLR_{\min,d} &< \overline{SLR} - \delta \end{aligned} \quad (18)$$

$$SHF^n = \begin{cases} c_0^n \cdot \overline{SLR} \\ 1 + \frac{(1 - c_0^n \cdot \overline{SLR} + c_0^n \cdot \delta)^3 \cdot (1 - c_0^n \cdot \overline{SLR} - 3c_0^n \cdot \delta)}{16(c_0^n \cdot \delta)^3} \\ 1 \end{cases}$$

$$\begin{aligned} SLR_{\min,n} &> \overline{SLR} - \delta \\ \overline{SLR} + \delta &\geq SLR_{\min,n} \geq \overline{SLR} - \delta \\ SLR_{\min,n} &< \overline{SLR} - \delta \end{aligned}$$

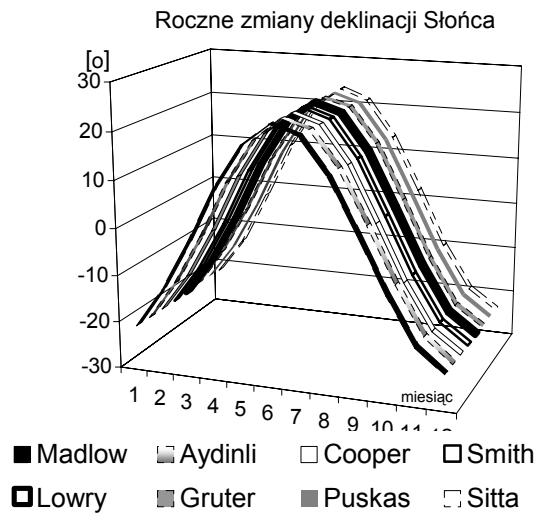
3. WYZNACZENIE DŁUGOŚCI DNIA

Można określić kilka modeli obliczania długości pory dziennej. Jest to funkcja przede wszystkim szerokości geograficznej Φ i kąta deklinacji Słońca δ .

$$t_d = \frac{2}{15} \arccos(-\operatorname{tg}\phi \cdot \operatorname{tg}\delta) \quad (19)$$

Modele deklinacji Słońca:

Rozważano modele [3] Madlow'a, Aydinli'ego, Cooper'a, Smith'a, Lowry'ego, Gruter'a, Puskasa i Sitta. Postać graficzną tych zależności przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Roczne zmiany deklinacji Słońca.
Fig.1. Annual change solar declination.

Ze względu na uzyskaną wystarczającą dokładność i zbieżność wyników przyjęto do obliczeń czasu trwania dnia model zaproponowany przez Cooper'a, który przedstawia wzór 20.

$$\delta = 23,45^{\circ} \sin[N_d(284 + J)] \quad (20)$$

gdzie:

N_d -

J- kolejny numer dnia w roku,

$N_d = 2\pi / (\text{ilość dni w roku})$.

4. OPIS ANALIZOWANEGO OBIEKTU

Analizie poddano budynek mieszkalny jednorodzinny wolnostojący. Charakterystyki geometryczne obiektu zestawiono w tabeli 1. Współczynniki przenikania ciepła dla przegród zewnętrznych spełniają wymagania zawarte w [6]. Konstrukcja budynku tradycyjna, murowa, dach jętkowy, pokrycie dachówką ceramiczną.

Charakterystyka pasywnego systemu słonecznego:

Magazyn ciepła stanowią dwa elementy:

-ściana ceglana o grubości 25 cm usytuowana w odległości 130 cm od lica wewnętrznego ściany zewnętrznej. Przestrzeń między przeszkleniem a kolektorem w 10 % jest zasłonięta. Kolektor usytuowano w salonie połączo-

nym z otwartą na salon kuchnią. Kuchnia znajduje się od strony północno- zachodniej.

-posadzka kamienna umieszczona między ścianą zewnętrzną a ścianą ceglana. Grubość warstwy posadzki wynosi 3 cm. Kolektor znajduje się za przeszkleniem w salonie.

-na poddaszu – ściana ceglana o grubości 25 cm. Kolektory umieszczono w dwóch sypialniach. Do kolektorów promieniowanie słoneczne dociera przez przeszklenie znajdujące się w pochylej części połaci dachowej. Kolektory słoneczne i okna usytuowane są (oczywiście) od strony południowej budynku.

Tabela 1. Parametry geometryczne budynku.

Table 1. Geometric parameters of building.

Element budynku	Jednostka	Wartość
Powierzchnia przegród zewnętrznych	m ²	269,7
Ściany zewnętrzne	m ²	96,3
Okna i drzwi balkonowe	m ²	19,8
Drzwi pełne zewnętrzne	m ²	3,8
Stropodach	m ²	36,5
Strop nad poddaszem	m ²	48
Podłoga na gruncie	m ²	61,3
Powierzchnia użytkowa	m ²	210
Powierzchnia użytkowa ogrzewana	m ²	150,5
Kubatura ogrzewana	m ³	446
Stosunek powierzchni okien do powierzchni kondygnacji w obrysie zewnętrznym ścian:		
na parterze		1,62
na poddaszu		0,06
Współczynnik kształtu	m ⁻¹	0,605

Charakterystykę systemu pasywnego bezpośredniego pozyskiwania energii słonecznej zawiera tabela 2. Przyjęto podstawowe założenie dotyczące kształtu zarówno budynku jak i kolektorów słonecznych, że nie będzie się

zbyttno zmieniać przyzwyczajęń „psychologicznych” użytkowników. Tak więc bryłę kolektora wpasowano w przestrzeń budynku w sposób umożliwiający powstanie „ogrodu zimowego”- przestrzeń między przeszkleniem a kolektorem zagospodarowano zielenią. Część powierzchni kolektora poziomego zajmują meble i dywan. Do obliczeń, zysków od pasywnego systemu słonecznego, przyjęto najmniejszą powierzchnię kolektorów i tym samym małą masę akumulacyjną.

Tabela 2. Parametry pasywnego systemu słonecznego.
Table 2. Parameters of passive solar system.

Element systemu	Jednostka	Wartość
Ściana ceglana - parter	m ³	3,7
Posadzka kamienna	m ³	0,4
Przeszklenie- parter	m ²	15,7
Kubatura ogrzewana pomieszczeń - parter	m ³	125
Ściana ceglana - poddasze	m ³	3,2
Przeszklenie- poddasze	m ²	6,72
Kubatura ogrzewana pomieszczeń - poddasze	m ³	33
Pojemność cieplna- łącznie		11813
Ściana ceglana- parter		5861
Podłoga - parter		883
Ściana ceglana -poddasze		5069
Powierzchnia kolektora - łącznie		41
ściany kolektorowej	m ²	27,6
podłogi kolektorowej		13,3

Budynek usytuowano w linii północ- południe. Południowa strona budynku nie jest zacieniona żadnymi elementami elewacji ani zielenią czy innymi obiektami. Integralną częścią systemu jest izolacja nocna w postaci rolet izolowanych termicznie, a zamontowanych w będnach wewnątrz budynku.

5. ANALIZA WYNIKÓW

Zysk słoneczny dla tego budynku wynosi 2,6 % całkowitego sezonowego zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania pomieszczeń. Wynosi 577 kWh/rok. Zastosowanie izolacji nocnej zwiększa oszczędność energii o 7,8 %.

Wartość oszczędności wynosi 1888 kWh/rok. Zestawienie zysków podaje tablica 3.

Tablica 3. Zyski energetyczne uzyskane w budynku z pasywnym systemem słonecznym.

Table 3. Gain of thermal energy solar-dependent.

Element budynku	Zysk KWh/rok	Procentowa wartość zysku %
Magazyn termiczny	577	2,6
Izolacja nocna	1888	7,8
Podwyższona szczelność stolarki okiennej	419	1,7

Należy podkreślić, że powierzchnia przeszklenia budynku słonecznego w stosunku do tradycyjnego wzrosła o 61 % – tak więc wzrosły straty przez przenikanie.

W budynku przewiduje się montaż systemu wentylacji nawiewno- wywiewnej sterowany automatycznie, ponieważ nadmiar energii ma być usuwany przez wentylację (dlatego podwyższoną szczelność stolarki traktuje się jako element systemu słonecznego). System instalacji wentylacji wymuszonej jest, w tym przypadku, elementem integralnym budynku słonecznego. Wartość opałow zysków wynosi około 0,36 tony paliwa umownego na rok. Struktura wartości zysku jako paliwa umownego:

-magazyn termiczny – 0,071 t p.u./a,
-izolacja nocna- 0,232 t p.u./a,
-podwyższona szczelność stolarki – 0,052 t p.u./a.

6. WNIOSKI

W analizowanym budynku słonecznym pojemność cieplną kolektorów słonecznych przyjęto bardzo małą, aby ocenić minimalną wartość zysku energetycznego. Projektując większy kolektor słoneczny uzyska się większe oszczędności. Takie analizy mogą mieć dużo większe znaczenie jeśli byłaby rozważana oszczędność kosztów ogrzewania odniesiona do kosztu inwestycyjnego. A niewątpliwą zaletą systemu pasywnego pozyskiwania energii jest relatywnie niski koszt inwestycyjny.

PASSIVE SOLAR SYSTEM

Summary: The paper presents mathematical model of the passive solar system. Building using the passive solar system consist of internal partition walls and stons floor (between external and partition walls) in the ground floor and internal breaks walls in the garret. Mathematical analysis apply to solar gain as a stored heat direct passive solar system, part of seasonal heating requirement.

Literatura

- [1] Barakat, Sander, *A simple method for determining the heating requirements of direct gain passive solar houses*, Building research- Canada, Ottawa 1982.
- [2] Kisilewicz T., *Bierne systemy ogrzewania słonecznego*, Problematyka Budownictwa, Warszawa 1984.
- [3] Kittler R., Mikler J., *Zaklady vyuzivania slnečného žiarenia*, VEDA Vydavateľ'stvo Slovenskej Akadémie VIED, Bratislava 1986.
- [4] Mazria E., *The passive solar energy book*, Rodale Press 1979.
- [5] Wray W.O., Balcomb J.D., *A semi- Empirical Method for estimating the performance of Direct Gain, Passive Solar Heated buildings*, Los Alamos Scientific Laboratory Publication LA-UR-79-117, 1979.
- [6] Dziennik Ustaw Nr 75, poz.690 z 12 kwietnia 2002.