

RADIOISOTOPE THERMOELECTRIC GENERATORS

Josef Svoboda

Bachelor Degree Programme (3), FEEC BUT

E-mail: xsvobo90@stud.feec.vutbr.cz

Karel Katovský

E-mail: katovsky@feec.vutbr.cz

Abstract: Providing of electric energy is necessary for all space vehicles, satellites and other equipment in space missions. Security of its supply comes to be the most important matter in these missions. The places with low intensity of insolation cannot use photovoltaic cells. For these cases RTG (Radioisotope thermoelectric generators) are usually used. Problems of utilization of these sources of electric energy, their constructions and types are described in the paper.

Keywords: RTG, RHU, GHPS, radioisotope, ^{238}Pu , Stirling engine, thermoelectric cell

1. ÚVOD

Radioizotopový termoelektrický generátor (dále RTG) patří mezi zdroje elektrické energie dodávající do místa spotřeby výkon až ve stovkách W_e . Hlavní využití RTG je nedílně spojeno s vesmírem, respektive misemi mimo planetu Zemi. V převážné většině se při kosmických misích využívá fotovoltaiických článků, které přeměňují energii na principu fotoelektrického jevu (fotoefekt). Elektrický výkon těchto zdrojů je závislý na ploše instalovaných článků a na intenzitě záření. Pro kosmické mise je velikost zařízení velmi důležitá, jelikož doprava objemných a těžkých zařízení je neekonomická a velmi pracná. Z toho důvodu nelze využít fotovoltaiické články jako zdroj elektrické energie pro mise do vzdálenějších částí sluneční soustavy, protože intenzita záření klesá se čtvercem vzdálenosti od Slunce. Mise na odvrácenou stranu měsíce jsou také nepředstavitelné s použitím fotovoltaiických článků, stejně tak jako mise do míst s častými písečnými bouřemi. Řešením jsou právě RTG, které mají výborné vlastnosti pro vyslání do kosmu, nebo obecně pro práci v bezobslužném stavu. Tento článek vychází ze semestrální práce autora článku [1].

2. RADIOIZOTOPOVÝ TERMOELEKTRICKÝ GENERÁTOR

Pro tento zdroj tepelné a elektrické energie je užívána zkratka RTG (Radioisotope Thermoelectric Generator). Korektnější označení pak je RHU (Radioisotope Heater Unit) pro čistě tepelné zdroje a RTG pro zdroje s již konvertovanou tepelnou energií na energii elektrickou. Tepelná energie je získávána přeměnou z vazebné energie atomových jader. Zdroj této energie souvisí s objevem přirozené radioaktivity jader určitých nestabilních izotopů, která byla objevena A. H. Becquerem 1896. Radioaktivitou je chápána schopnost atomových jader vysílat záření. Dělí se na radioaktivitu samovolnou, neboli přirozenou (přírodní) a vynucenou radioaktivitu, neboli umělou. Radioaktivní záření se skládá ze tří různých složek, a to α , β , a γ . Přímým důsledkem záření je úbytek nestabilních jader.

Hlavním kritériem pro možnost využití radioizotopu v RTG je jeho poločas přeměny a právě druh přeměny. Druh přeměny je důležitý z důvodu stínění elektronických součástí systému před zářením a hlavně z důvodu efektivity předání energie cílové části systému. Poločas přeměny značíme $T_{1/2}$ a statisticky vyjadřuje dobu, za kterou se právě polovina jader daného izotopu přemění jednou z již uvedených přeměn. Tento parametr je důležitý pro výpočet maximální možné doby provozování elektroenergetického zdroje. Při přeměně jednotlivých jader se uvolňuje energie, která je kinetickou formou emitovaných částic přenesena do cílového materiálu a přemění se na energii tepelnou. V případě RHU je tímto proces přeměn energií u konce a daný zdroj dodává tepelnou energii potřebnému systému, pro který je určen. Stejný princip platí v RTG, s tím rozdílem, že tepelná

energie není předávána okolí, nýbrž konvertoru, který tepelnou energii přemění na energii elektrickou. Obecně lze říci, že nejvhodnější je radioizotop s přeměnou α a poločasem přeměny v řádu let.

2.1. PLUTONIOVÝ TERMoeLEKTRICKÝ GENERÁTOR

Plutoniový termoelektrický generátor je ve vesmírných misích nejčastěji užívaným RTG. Generátor pracuje s izotopem ^{238}Pu . Tento izotop je nejpoužívanější z důvodu uspokojivého poločasu přeměny $87,7 \pm 0,3$ let, který je pro účel vyslání zařízení do kosmu takřka ideální. Právě díky poměrně dlouhému poločasu přeměny, má tento generátor schopnost dodávat po dlouho dobu konstantní napětí. Další důvod k využití ^{238}Pu je přeměna α , při které se ^{238}Pu přemění na ^{234}U za emise jader helia ^4He a uvolnění vazebné energie o celkové velikosti $5593,2 \text{ keV}^1$. Tato energie je unášena z necelých 100 % částicemi alfa o dvou významných hladinách. Ze 70,91 % se jedná o alfa s energií $5499,03 \text{ keV}$, z 28,98 % o alfa s energií $5456,3 \text{ keV}$ a ze zbylých 0,11 % jde o alfa nižších energií. Na jednu přeměnu izotopu ^{238}Pu se uvolňuje pouze velmi malé množství fotonů doprovodného záření gama a záření X. Nejintenzivnější linka záření gama má energii $43,5 \text{ keV}$ a intenzitu 0,04 % na jednu přeměnu, u záření X je nejintenzivnější emise fotonu o energii $13,6 \text{ keV}$ s intenzitou 3,79 %. Takto nízké intenzity a energie doprovodného elektromagnetického záření umožňují efektivní stínění důležitých elektronických součástek. Energii přeměny přenášejí tedy zejména jádra helia, která je předají vlastní matici paliva a obálce paliva, která následně předá tepelnou energii převážně kondukcí konvertoru. Z jednoduchého výpočtu plyne, že pro získání $1\,000 \text{ W}_t$ je za potřebí asi $2,2 \text{ kg } ^{238}\text{Pu}$. Jako palivo pro tento typ RTG se ale nepoužívá čisté ^{238}Pu , nýbrž sloučenina PuO_2 v keramické podobě. Celková hmotnost paliva pro danou energii je tedy asi $2,5 \text{ kg}$.

Konstrukce Pu-RTG

Palivovým článkem je tedy PuO_2 , které je hermeticky obklopeno obálkou a zasunuto v tepelné jednotce. Celý systém poskládaného peletkového paliva do tepelného zdroje se nazývá GPHS (General Purpose Heat Source). Důležité jsou velikosti jednotlivých peletek, asi $2,75 \text{ cm}$ v průměru s výškou asi $2,75 \text{ cm}$. Každá peletka má výkon asi 60 W_t .

Soustava GPHS modulů je pak zdrojem tepelné energie pro RTG. Na povrchu GPHS modulů se nacházejí konvertory pro přeměnu tepelné energie na ušlechtlejší formu, energii elektrickou.

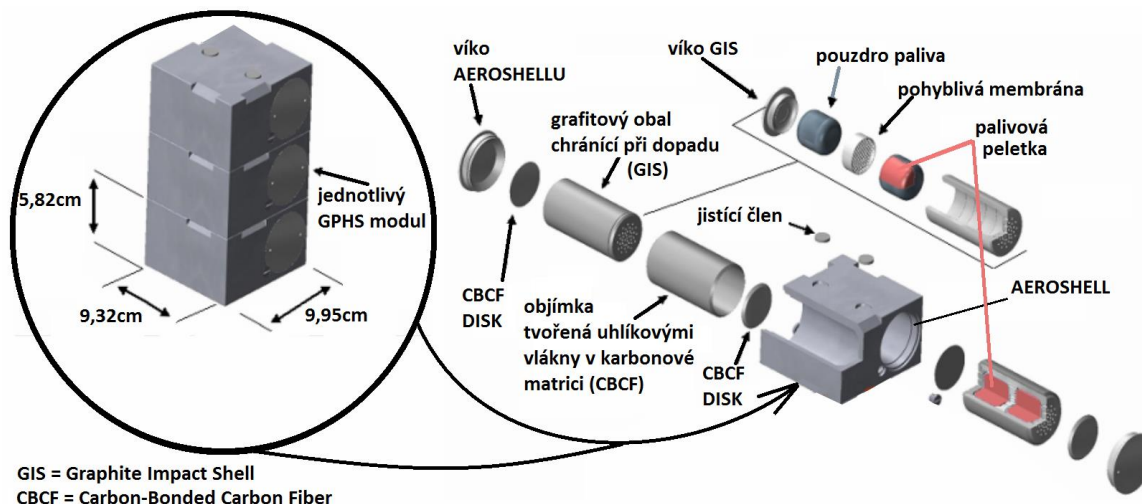
Konvertory (přeměna tepelné energie na elektrickou)

Hlavní výhodou, kterou RTG pro kosmické výpravy mají, je spolehlivost dodávky energie i po otřesy tvořícím přistání. RTG pro kosmické mise jsou tvořeny pouze nepohyblivými částmi, což s sebou nese jejich hlavní nevýhodu, a to nízkou účinnost přeměny tepelné energie na elektrickou. Přeměna se provádí pomocí termoelektrických článků na principu Seebeckova jevu. Nízkou účinnost v jednotkách procent (aktuálně 5-7 %) vykrývá vysoká spolehlivost. Agentura NASA prováděla pokusy i se speciální plynovou turbínou (tzv. Braytonův systém – účinnost 30 %). Do budoucna se uvažuje o Stirlingově motoru s účinností až 20 % tzv. ASRG (Advanced Stirling Radioisotope Generator).

V listopadu 2011 byla vypuštěna sonda Mars Science Laboratory, obsahující vozítko Curiosity, které je poháněno novým typem RTG, značeným MMRTG (Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator). I MMRTG však využívá termoelektrických článků, jiné možnosti přeměn, jako třeba termionické přeměny, bohužel nejsou pro RTG v reálných podmínkách použitelné.

U MMRTG se jedná o osm modulů produkujících 2 kW_t , z čehož se přeměnou pomocí termoelektrických článků generuje pouze 120 W_e . Pro ASRG se uvažuje dvojice Stirlingových motorů, pracujících s 500 W_t , které přemění zhruba na 125 W_e . Zbytkovou tepelnou energii lze využít k ohřívání citlivých součástí. Právě účinnost přeměny je velmi důležitá z hlediska celkové hmotnosti sondy dopravované do vesmíru. Dalším důvodem ke snížení objemu vysílaného ^{238}Pu do kosmu, je jeho akutní nedostatek.

¹ <http://ie.lbl.gov/toi/nuclide.asp?iZA=940238>, databáze LBNL Berkeley, USA a LUND University, Švédsko, autoři L.P. Ekström and R.B. Firestone, „WWW Table of Radioactive Isotopes“, verze z ledna 2004.



Obrázek 1: Kontrukce GPHS, zpracováno z [2]

Nejznámější družice v kosmu s RTG

První oficiální využití RTG v kosmických misích se váže k počátku 70. let 20. století. Do vesmíru bylo oficiálně vysláno na 29 zařízení s RTG (započteny i RHU), a několik dalších tajných zařízení s tentýž zdrojem. Mimo zmiňované vozítko Curiosity ještě například Pioneer 10 a 11, Voyager 1 a 2, Galileo, Ulysses, Mars Pathfinder, Cassini, Mars Exploration Rovers a také sonda New Horizons.

2.2. POLONIOVÝ A STRONCIOVÝ TERMOELEKTRICKÝ GENERÁTOR

Palivo ve formě ^{210}Po bylo používáno pro tzv. lunochod na měsíci a údajně také pro utajené špiónážní družice. Přirozená radioaktivita s přeměnou α a poločasem rozpadu 138,38 dní není ale dostačující pro dlouhé mise. Proudem jader helia ^4He je odnášena energie 5407,5 keV z každé jaderné přeměny. Tento izotop využíval Sovětský svaz a nyní se již pro RTG nepoužívá.

Radioizotopové zdroje pracující na bázi stroncia byly využívány pro napájení pobřežních majáků severozápadního pobřeží Sovětského svazu od 60. let. U tohoto RTG byl ale problém se stíněním a předáním energie. Z důvodu, že se při přeměně β emitují pronikavější částice oproti přeměně α , ale zároveň mají menší ionizační schopnost, se celý systém stává složitějším. Problémem u těchto majáků, resp. přímo energetických zdrojů, byla možnost teroristického zneužití k přípravě tzv. „dirty bomb“ (špinavé bomby). Dalším důvodem k postupnému organizovanému rozebírání a demontování, byla nebezpečnost neoprávněného vstupu sběračů vzácných kovů, ze kterých jsou vyrobeny konstrukce RTG. Několik majáků bylo takto po rozpadu Sovětského svazu zničeno a rozkradeno.

3. ZÁVĚR

Zdroje elektrické energie na bázi RTG mají bohatou minulost a slibnou budoucnost. Jejich hlavními přednostmi jsou spolehlivost, dodávka konstantního napětí a jednoduchost. Negativní slabinou je nízká účinnost přeměny tepelné energie na elektrickou a nedostatek ^{238}Pu . Do budoucna lze předpokládat zvýšení účinnosti termoelektrických článků z důvodu širšího výzkumu a rozvoje nanotechnologií, případně využití účinnějších konvektorů, jako například Stirlingova motoru nebo plynových turbín.

REFERENCE

- [1] Svoboda, Josef. *Nekonvenční zdroje jaderné energie*. VUT Brno, 2012.
- [2] Caponiti, Alice. *Pu-238 Production – Restoring a Reliable Supply*. Proc. of NETS Conference 2011, Alb, NM.