

NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD

CEI
IEC

61468

2000

AMENDEMENT 1
AMENDMENT 1
2003-06

Amendement 1

**Centrales nucléaires de puissance –
Instrumentation en-cœur –
Caractéristiques et méthodes
d'essais des collecteurs**

Amendment 1

**Nuclear power plants –
In-core instrumentation –
Characteristics and test methods
of self-powered neutron detectors**

© IEC 2003 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

International Electrotechnical Commission, 3, rue de Varembé, PO Box 131, CH-1211 Geneva 20, Switzerland
Telephone: +41 22 919 02 11 Telefax: +41 22 919 03 00 E-mail: inmail@iec.ch Web: www.iec.ch



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

N

*Pour prix, voir catalogue en vigueur
For price, see current catalogue*

AVANT-PROPOS

Le présent amendement a été établi par le sous-comité 45A: Instrumentation des réacteurs, du comité d'études 45 de la CEI: Instrumentation nucléaire.

Le texte de cet amendement est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
45A/485/FDIS	45A/489/RVD

Le rapport de vote indiqué dans le tableau ci-dessus donne toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de cet amendement.

Le comité a décidé que le contenu de la publication de base et de ses amendements ne sera pas modifié avant 2004. A cette date, la publication sera

- reconduite;
- supprimée;
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

Page 2

SOMMAIRE

Ajouter, à la page 4, le titre de l'Annexe B comme suit:

Etat de l'art relatif aux collectrons dans les réacteurs de conception russe (VVER et RBMK)

Page 56

Ajouter, après l'Annexe A, le texte de l'Annexe B comme suit:

Annexe B (informative)

Etat de l'art relatif aux collectrons dans les réacteurs de conception russe (VVER et RBMK)

B.1 Champs d'application

La présente annexe s'inspire du développement, de la fabrication et de l'utilisation des collectrons dans les réacteurs électronucléaires russes. Le collectron est étudié en tant que dispositif électrotechnique de mesure et de surveillance. Les exigences concernant les caractéristiques électriques des collectrons s'entendent pour un schéma de circuit type. Cette approche justifie l'utilisation des collectrons aux températures élevées qui caractérisent l'environnement en-cœur d'un réacteur de puissance.

FOREWORD

This amendment has been prepared by subcommittee 45A: Reactor instrumentation, of IEC technical committee 45: Nuclear instrumentation.

The text of this amendment is based on the following documents:

FDIS	Report on voting
45A/485/FDIS	45A/489/RVD

Full information on the voting for the approval of this amendment can be found in the report on voting indicated in the above table.

The committee has decided that the contents of the base publication and its amendments will remain unchanged until 2004. At this date the publication will be

- reconfirmed;
- withdrawn;
- replaced by a revised edition, or
- amended.

Page 3

CONTENTS

Add, on page 5, the title of Annex B as follows :

State of the art of SPNDs on Russian designed reactors (VVER and RBMK)

Page 57

Add, after Annex A, the text of Annex B as follows :

Annex B (informative)

State of the art of SPNDs on Russian designed reactors (VVER and RBMK)

B.1 Scope

This annex is based on the development, manufacture and use of SPNDs in Russian power reactors. The SPND is examined as an electrotechnical device intended for measurement and monitoring purposes. Requirements of electrical characteristics are given on the basis of a typical SPND circuit diagram. This approach substantiates the use of SPNDs at high temperatures typical of the in-core environment in power reactors.

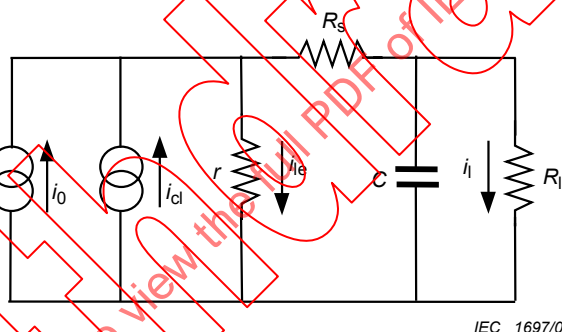
Une équation décrivant le courant du collectron a été mise au point afin de déterminer le flux neutronique dans les collectrons à activation, sans retard au niveau du temps de réponse. L'utilisation de collectrons rhodium pour les mesures ou pour le contrôle automatique et la protection permet une simplification importante du système de mesure, tout en améliorant sa précision.

La partie traitant des caractéristiques du collectron a été enrichie. Lors du calcul de l'épuisement, il est possible de montrer que la prise en compte de la dépression du flux neutronique dans l'émetteur permet de réduire l'épuisement d'un facteur de 1,5 à 2. Un critère représentant la valeur maximale d'erreur de mesure admissible a été incorporé au calcul de durée de vie.

Figure également une partie traitant des "erreurs de mesure". Le collectron étant un appareil de mesure et de surveillance, il est souhaitable de réduire les erreurs de mesure au minimum.

Cette annexe comporte un ensemble de recommandations concernant la conception, les essais, l'étalonnage et l'application, ceci afin de permettre à l'utilisateur d'optimiser les caractéristiques métrologiques et opérationnelles du collectron. Des plans d'ensembles collectron utilisés en Russie sont fournis pour des réacteurs de type VVER et RBMK.

B.2 Mécanismes de génération de signaux des détecteurs de collectron



- r résistance d'isolement du collectron
- R_s résistance série de l'âme du collectron et du câble de transmission du signal vers l'appareil de mesure
- R_l résistance de charge (appareil de mesure)
- C capacité totale du collectron et du câble de transmission du signal vers l'appareil de mesure
- i_0 courant primaire de l'émetteur
- i_l courant de charge (appareil de mesure)
- i_{cl} courant du câble de transmission du signal collectron
- i_{le} courant de fuite

Figure B.1 – Représentation du circuit typique d'un détecteur collectron

Le signal utile du collectron, dont le schéma de principe est représenté par la Figure B.1, est obtenu par l'application de l'équation suivante:

$$i_l = (i_0 + i_{cl}) \times r / (r + R_s + R_l)$$

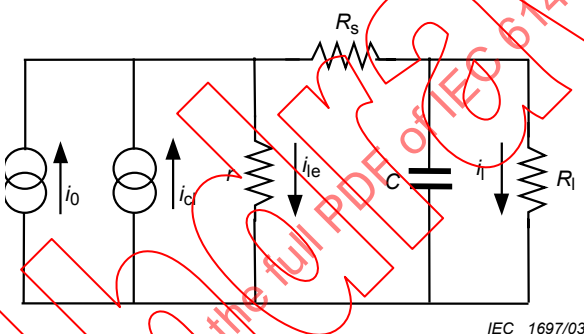
An equation of SPND current has been developed to demonstrate neutron flux monitoring for activation type SPNDs without a delay in response time. The use of activation type rhodium SPNDs either for measurement or for automatic control and protection can substantially simplify the measurement system and provide improved accuracy.

The section of SPND characteristics is complemented. During determination of burn-up, it can be shown that taking into account the depression of neutron flux in the emitter reduces the burn-up by factors of 1,5 to 2. The criterion of maximum permissible value of measurement error is introduced during determination of service life.

A section covering "measurement errors" is also presented as SPND detectors are used for measurement and monitoring so that the minimization of measurement error is desirable.

Recommendations on design, tests, calibration and application are provided for the user to optimize the metrological and operational SPND characteristics. Designs of assemblies being used in Russia are shown for both VVER and RBMK type power reactors.

B.2 Mechanisms of signal generation by SPND detectors



- r SPND insulation resistance
- R_s in-series resistance of SPND lead wires and signal wire from SPND to measuring device
- R_l load resistance (measuring device)
- C total capacity of SPND detector and signal wire to measuring device
- i_0 emitter's primary current
- i_l load current (measuring device)
- i_{cl} current of SPND signal wire
- i_{le} leak current

Figure B.1 – Circuit representation of a typical SPND detector

The useful signal of the SPND which diagram principle is presented in Figure B.1 is obtained using the following equation

$$i_l = (i_0 + i_{cl}) \times r / (r + R_s + R_l)$$

Il existe différents types de collectrons:

a) Les collectrons de type Compton

Ces collectrons exploitent la présence des électrons Compton et des photoélectrons créés lors de l'interaction du quantum gamma de la capture radioactive avec les matériaux de l'émetteur. Si l'on considère le processus de génération du courant, les collectrons Compton n'entraînent pas de retard du temps de réponse par rapport à la densité du flux neutronique.

b) Les collectrons à activation

Le processus de génération du courant dans les collectrons à activation est défini par la capture radioactive avec formation puis désintégration d'un nucléide bêta. Le courant ainsi généré est l'une des composantes d'activation du courant produit par un collectron à activation (i_{act}).

Les électrons Compton et les photoélectrons créent dans les collectrons à activation la composante Compton (instantanée) du courant ($i_{n\gamma}$). Typiquement, cette composante correspond à environ 5 % à 10 % du courant bêta. L'équation définissant le courant induit (i_n) créé par les neutrons dans le détecteur du collectron à rhodium est la suivante:

$$i_n + \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\lambda_1 \times \lambda_2} \times \frac{di_n}{dt} + \frac{1}{\lambda_1 \times \lambda_2} \times \frac{d^2 i_n}{dt^2} = \eta_n \varphi + \left[\frac{\eta_{n\gamma} (\lambda_1 + \lambda_2)}{\lambda_1 \times \lambda_2} + \frac{\eta_{1a}}{\lambda_2} \right] \frac{d\varphi}{dt} + \frac{\eta_{n\gamma}}{\lambda_1 \times \lambda_2} \times \frac{d^2 \varphi}{dt^2}$$

où

φ est la densité du flux neutronique à l'emplacement du détecteur ($m^{-2} \cdot s^{-1}$);

η_n est la sensibilité aux neutrons du détecteur ($A \cdot m^2 \cdot s$);

$\eta_{n\gamma}$ est la composante instantanée de la sensibilité aux neutrons ($A \cdot m^2 \cdot s$);

η_{1a} est la composante d'activation de la sensibilité aux neutrons déterminée par la génération directe de Rh_{104} ($A \cdot m^2 \cdot s$);

λ_1 est la constante de désintégration du nucléide Rh^{104} (s^{-1});

λ_2 est la constante de désintégration du nucléide Rh^{104m} (s^{-1});

$\lambda = 0,693/T_{1/2}$;

$T_{1/2}$ est la période ou la demi-vie du nucléide;

t est le temps.

Les équations mises au point pour les collectrons à rhodium permettent de déterminer la densité du flux neutronique quasiment sans retard du temps de réponse. Dans les faits, on utilise à la fois des méthodes de résolution analogiques et numériques.

B.3 Principales caractéristiques du collectron

Les principales caractéristiques du collectron sont les suivantes.

a) Réponse neutronique du collectron

Elle peut être exprimée par l'équation suivante:

$$\eta = e \times f \times N \times \sigma$$

où

e est la charge de l'électron;

f est un coefficient permettant d'intégrer la perturbation du flux neutronique par le détecteur, l'absorption des β , les électrons Compton et les photoélectrons dans les matériaux de l'émetteur et de l'isolant, l'absorption des γ provoqués par la capture radioactive dans les matériaux de l'émetteur et de l'isolant; cette valeur correspond à une fraction des neutrons contribuant au courant du collectron résultant de l'interaction avec le matériau de l'émetteur;

The types of SPNDs are:

a) Compton-type SPNDs

These detectors make use of Compton and photo-electrons born during interaction of gamma-quanta of radiation capture with emitter's material. The current of Compton-type SPND detectors has no delay in response time in respect to the neutron flux density, if we consider the basic current generation process.

b) Activation-type SPNDs

The basic current generation process in activation-type SPNDs is defined by radiation capture with formation and subsequent disintegration of a beta-nuclide. The current that is generated due to this process is an activation component of the activation-type SPND current (i_{act}).

Compton and photo-electrons create in activation SPNDs the Compton (prompt) component of the activation SPND current ($i_{n\gamma}$). Usually it represents about 5 % to 10 % of the beta-particles current. The equation of Rh-SPND detector's neutron induced current (i_n) is as follows:

$$i_n + \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\lambda_1 \times \lambda_2} \times \frac{di_n}{dt} + \frac{1}{\lambda_1 \times \lambda_2} \times \frac{d^2 i_n}{dt^2} = \eta_n \varphi + \left[\frac{\eta_{n\gamma} (\lambda_1 + \lambda_2)}{\lambda_1 \times \lambda_2} + \frac{\eta_{1a}}{\lambda_2} \right] \frac{d\varphi}{dt} + \frac{\eta_{n\gamma}}{\lambda_1 \times \lambda_2} \times \frac{d^2 \varphi}{dt^2}$$

where

φ is the neutron flux density in the detector's location place ($m^{-2} \cdot s^{-1}$);

η_n is the detector's neutron sensitivity ($A \cdot m^2 \cdot s$);

$\eta_{n\gamma}$ is the prompt component of neutron sensitivity ($A \cdot m^2 \cdot s$);

η_{1a} is the activation component of neutron sensitivity determined by Rh₁₀₄ direct generation ($A \cdot m^2 \cdot s$);

λ_1 is the Rh¹⁰⁴ nuclide disintegration constant (s^{-1});

λ_2 is the Rh^{104 m} nuclide disintegration constant (s^{-1});

$\lambda = 0,693/T_{1/2}$;

$T_{1/2}$ is the nuclide's half-life;

t is the time

Equations developed for Rh-SPND make possible determination of neutron flux density virtually without delay in response time. In practice, both analog and digital methods of solving the equations are used.

B.3 SPND main characteristics

The main SPND characteristics are the following.

a) SPND neutron response

It can be represented by the following equation:

$$\eta = e \times f \times N \times \sigma$$

where

e is the electron charge;

f is a coefficient which takes into account perturbation of the neutron flux by the detector, absorption of β -particles, Compton and photoelectrons in emitter's and insulator's material, absorption of γ which is the quanta of radiation captured in the emitter's and insulator's material; it is equal to a fraction of the neutrons contributing to the SPND current as a result of interaction with the emitter's material;

N est le nombre d'atomes de l'élément sensible aux neutrons par unité de volume de l'émetteur;

σ est la section de capture radioactive.

b) Modification de la réponse du collectron (épauement)

On peut exprimer le taux de réduction du nombre de noyaux de l'émetteur à la suite d'une réaction nucléaire de la manière suivante:

$$dN/dt = f_n \times N \times \sigma \times \varphi$$

où f_n est le coefficient traduisant la perturbation du flux neutronique par le détecteur.

La variation de réponse est fonction de la charge électrique (q) générée par le collectron: $d\eta/dq = f_n \times \sigma$. Il est pratique d'utiliser le taux de variation de la réponse comme valeur initiale de la réponse: $B = d\eta / (\eta_0 dq)$.

c) La reproductibilité de la réponse initiale (δ_0)

Elle correspond à l'écart de la réponse ($\Delta\eta_0$) par rapport à la valeur nominale sur la valeur nominale de réponse:

$$\delta_0 = \Delta\eta_0 / \eta_0$$

d) Réponse-gamma (η_γ)

C'est le courant généré par le collectron dans un champ gamma à un débit de dose unitaire:

$$\eta_\gamma = i_\gamma / P$$

où P est le débit de dose.

e) Courant du câble de transmission

C'est le courant généré suite à l'interaction du rayonnement ionisant du réacteur avec le câble de transmission. Les courants produits dans le câble comprennent les composantes liées aux neutrons, aux électrons et rayonnements gamma.

f) Retard du temps de réponse

Des techniques de mesure ont été mises au point avec des collectrons à activation afin de mesurer la densité du flux neutronique sans retard du temps de réponse.

g) Résistance d'isolement

- Il n'existe aucun lien direct entre la résistance d'isolement du collectron dans des conditions climatiques normales (20 °C) et dans les conditions d'exploitation. Il convient que la valeur de la résistance d'isolement soit fournie par le fabricant, et sa vérification sert de preuve que le collectron a passé avec succès toutes les étapes du procédé de fabrication. Il convient que la valeur recommandée à 20 °C (y compris dans les assemblages) ne soit pas inférieure à $10^9 \Omega$.
- La résistance d'isolement du collectron dans les conditions d'exploitation est déterminée en fonction de la valeur admissible du courant de fuite, par l'équation:

$$i_{le} = i_l \times (R_s + R_l) / r$$

Il convient que la résistance d'isolement recommandée ne soit pas être inférieure à $10^5 \Omega$, soit $i_{le}/i_l \leq 0,1 \%$. La valeur limite est susceptible de changer en cas d'une modification de la valeur admissible du courant de fuite.

h) Durée de vie du collectron

Elle est déterminée essentiellement par deux facteurs prépondérants:

- la dégradation des composants du collectron;
- une augmentation de l'erreur de mesure au-delà de la marge d'erreur admissible. Il convient que l'erreur fractionnée maximale recommandée (voir Article B.4) soit inférieure à $\delta f_n = \pm 6 \%$ (l'erreur quadratique moyenne la plus importante, $\sigma = \pm 2 \%$).

N is the number of atoms of neutron sensitive element in a unit of emitter's volume,
 σ is the radiation capture cross-section.

b) Change of SPND response (burn-up)

The rate of reduction of a number of emitter's nuclei as a result of nuclear reaction can be shown as

$$dN/dt = f_n \times N \times \sigma \times \varphi$$

where f_n is the coefficient which takes into account perturbation of the neutron flux by the detector.

The variation of response is a function of the electrical charge (q) produced by the SPND: $d\eta/dq = f_n \times \sigma$. It is convenient to use the rate of response variation referred to as the original response value $B = d\eta/(\eta_0 dq)$.

c) Reproducibility of initial response (δ_0)

This is the deviation of response ($\Delta\eta_0$) from the nominal value referred to the nominal value of response :

$$\delta_0 = \Delta\eta_0 / \eta_0$$

d) Gamma-response (η_V)

This is the current generated by the SPND in the gamma field at unit dose rate

$$\eta_V = i_V / P$$

where P is the dose rate.

e) Current of the signal wire

This is the current generated as a result of the interaction of reactor ionizing radiation with the SPND signal wire. Signal wire currents include neutron, electron and gamma constituents.

f) Delay in response time

Measurement techniques have been developed using activation type SPNDs that ensure measurement of neutron flux density without a delay in response time.

g) Insulation resistance

- There is no unequivocal link between SPND insulation resistance in normal climatic conditions (20 °C) and in operating conditions. The value of insulation resistance should be given by the manufacturer, and its fulfillment serves as an evidence that the detector has successfully passed all process procedures during manufacture. The recommended value at 20 °C (including that within assemblies) should be no less $10^9 \Omega$.
- SPND insulation resistance in operation conditions is determined on the basis of the admissible value of leakage current in equation

$$i_{le} = i_l \times (R_s + R_l) / r$$

The recommended insulation resistance should be no less than $10^5 \Omega$, which means $i_{le}/i_l \leq 0,1 \%$. The limit value can be changed in case of change of the permissible value of leakage current.

h) SPND service life

It is determined mainly by two factors:

- degradation of SPND components;
- increase of the measurement error above the permissible level. The recommended maximum fractional error (see Clause B.4) should be below $\delta_n = \pm 6 \%$ (RMS, the highest probable error, $\sigma = \pm 2 \%$).

B.4 Erreurs de mesure

L'erreur maximale partielle relative à la détermination du courant induit par le flux neutronique (δi_n) dans le collectron est la suivante:

$$\delta i_n = \delta_0 + \delta \eta_t + \delta i_\gamma + \delta i_{cl} + \delta i_e + \delta_d$$

où

δ_d est l'erreur de l'instrument de mesure;

δ_0 est l'erreur déterminée par la dispersion de la réponse initiale du collectron.

Il convient que la technologie spécifique employée pour la fabrication et la conception du collectron garantisse la reproductibilité de la réponse initiale aux limites de précision prédéterminées pour l'application concernée. Dans les cas où les procédés de fabrication ne permettent pas de garantir la reproductibilité de la réponse initiale, il peut s'avérer nécessaire de fournir une mesure d'étalonnage pour un lot de fabrication de collectrons. Il est recommandé de trier les détecteurs, en retenant uniquement ceux qui sont conformes aux exigences de la spécification technique applicable, selon les résultats de l'étalonnage du lot de fabrication de détecteurs, tout en tenant compte de la déviation autorisée de la réponse par rapport à la valeur standard choisie. La variation maximale recommandée de la réponse pour les détecteurs d'un lot donné est de: $\delta_0 = \pm 1 \%$ ($\sigma = \pm 0,33 \%$).

Il existe plusieurs erreurs de mesure:

a) Erreur de détermination de la réponse réelle du collectron ($\delta \eta_t$)

Elle est déterminée par la précision des corrections intégrées relatives à l'épuisement ou aux erreurs de calibration du collectron en cours d'exploitation.

L'erreur de détermination de la réponse réelle du collectron ($\delta \eta_t$) est déterminée comme suit:

$$\delta \eta_t = \frac{(\delta_B + \delta_Q) \times B \times Q}{100 - B \times Q}$$

où

$Q = \int_0^t i_n dt$ est la somme des charges électriques générées par le collectron;

B est la variation de réponse suite à l'épuisement par rapport à une charge électrique unitaire générée par un collectron lors de l'interaction des neutrons avec le matériau de l'émetteur;

δ_B et δ_Q sont les erreurs partielles liées à la détermination de B et Q .

La valeur maximale recommandée est de $\delta \eta_t = \pm 1 \%$ par année de fonctionnement du collectron ($\sigma = \pm 0,33 \%$).

La valeur de δ_Q a tendance à augmenter en même temps que l'accroissement de l'erreur de définition du courant induit par les neutrons du collectron. La valeur de δ_B dépend de la reproductibilité des paramètres déterminant la dispersion des caractéristiques de la réponse initiale (diamètre et longueur de l'émetteur, épaisseur et densité de l'isolant). Lorsque la technologie de fabrication utilisée ne garantit pas la reproductibilité des dimensions géométriques du collectron, l'étalonnage neutronique post-fabrication permet de déterminer la réponse neutronique initiale d'un lot de collectrons.

Lorsque des méthodes de calibration du collectron en service sont appliquées, la valeur maximale recommandée est la suivante: $\delta \eta_t = \pm 6 \%$ ($\sigma = \pm 2 \%$).

B.4 Measurement errors

Maximum fractional error of determining neutron induced current (δi_n) by SPND is as follows:

$$\delta i_n = \delta_0 + \delta \eta_t + \delta i_\gamma + \delta i_{cl} + \delta i_e + \delta_d$$

where

δ_d is the error of measuring instrument;

δ_0 is the error determined by scattering of SPND initial response.

The specific SPND design and fabrication technology should ensure reproducibility of the initial response within preset accuracy limits set for the particular application. In cases where it is not possible to ensure the reproducibility of the response required due to the manufacturing process, it may be necessary to provide a calibration measurement of a production lot of SPNDs. Based on the results of the calibration of the production lot of SPNDs, a selection process should be carried out for detectors which correspond to the requirements of the applicable technical specification with respect to the allowed deviation of response from the value accepted as a standard. The recommended maximum variation of response for detectors in a specific lot is $\delta_0 = \pm 1\%$ ($\sigma = \pm 0,33\%$).

Different types of errors can occur:

a) Error for determination of SPND actual response ($\delta \eta_t$)

It is determined by the accuracy of entering corrections on the burn-up or error of the SPND in-service calibration.

Error of determination of SPND actual response ($\delta \eta_t$) is determined as follows:

$$\delta \eta_t = \frac{(\delta_B + \delta_Q) \times B \times Q}{100 - B \times Q}$$

where

$Q = \int_0^t i_n dt$ is the sum of the electrical charges generated by an SPND;

B is the change of response due to burn-up in respect to a unit of electrical charge generated by an SPND due to interaction of the emitter's material with neutrons;

δ_B and δ_Q are the fractional errors of determining B and Q .

The recommended maximum value is $\delta \eta_t = \pm 1\%$ per year of SPND operation ($\sigma = \pm 0,33\%$).

The value of δ_Q tends to grow with the increase of error of definition of SPND current induced by neutrons. The value of δ_B depends on the reproducibility of the SPND parameters determining the scattering of the initial response characteristics (emitter's diameter and length, thickness and density of insulation). When manufacturing technology is used which does not ensure reproducibility of SPND geometrical dimensions, neutron calibration may be used following fabrication to determine the initial neutron response of a lot of SPNDs.

When in-service methods of SPND calibration are used, the following is the recommended maximum value: $\delta \eta_t = \pm 6\%$ ($\sigma = \pm 2\%$).

b) Erreur déterminée par la composante gamma du courant du collectron (δi_γ)

Elle dépend du rapport des valeurs des réponses neutron et gamma des détecteurs de collectron. Lorsque le détecteur est en service, il est pratiquement impossible de mesurer la contribution du courant induit par le rayonnement gamma au courant total du collectron. Quand le réacteur fonctionne en régime stable, le courant généré dû aux gamma est proportionnel au courant du collectron déterminé par sa réponse neutronique.

c) L'erreur partielle due aux courants de fuite (δi_e)

Le courant de fuite des collectrons s'exprime par l'équation suivante

$$i_{le} = (i_0 + i_{cl}) [1 - r / (r + R_S + R_l)]$$

et peut être pris en compte en intégrant la correction correspondante.

d) L'erreur partielle due au câble de transmission du signal (δi_{cl})

La correction du courant induit dans le câble est effectuée en définissant le courant du signal de transmission soit en utilisant un détecteur de bruit de fond spécial, soit en intégrant une âme supplémentaire lors de la conception du collectron.

L'erreur de mesure prise en compte pour corriger le courant induit dans le câble est égale à:

$$\delta i_{cl} = i_{cl} (\delta i_{cl} + \delta i) / (i - i_{cl})$$

Dans le cas d'un câble à base de fils torsadés, l'erreur est déterminée uniquement à partir du matériau isolant du câble et de la reproductibilité des diamètres de l'âme et du fil de compensation.

En cas d'utilisation d'un détecteur de bruit de fond, les éléments pris en compte comprennent le matériau isolant l'âme du câble, la reproductibilité des diamètres de l'âme signal et du fil de compensation, les gradients de densité de flux neutronique, les gamma et les électrons aux emplacements de l'âme et du fil de compensation, ainsi que l'erreur de conversion résultant des longueurs différentes des âmes et fils de compensation.

B.5 Applications recommandées pour collectrons

Les collectrons peuvent être utilisés pour effectuer les types de contrôle suivants:

- cartographie de la densité du flux neutronique (densité de puissance) selon les dimensions axiale et radiale du cœur du réacteur;
- contrôle automatique de la puissance du réacteur et de sa distribution dans le volume du cœur;
- protection automatique du réacteur par mesure de la puissance globale et de la puissance locale;
- applications concernant le bruit neutronique.

B.6 Recommandations relatives à la conception des collectrons

Il est recommandé d'intégrer les principes suivants lors de la conception d'un collectron:

- assurer une fiabilité maximale et une durée de vie satisfaisante;
- réduire au minimum les erreurs de mesure;
- réduire au minimum les interventions nécessaires pour la maintenance des détecteurs par l'exploitant (à l'exception de la calibration en service);
- contrôler la manutention en toute sécurité par le personnel lors du transport et du fonctionnement du collectron (minimisation de la radioactivité induite des collectrons).

b) Error determined by gamma-component of SPND current (δ_{γ})

It depends on the ratio of the neutron and gamma response values of SPND detectors. During operation of the detector, it is all but impossible to measure the contribution of the current induced by gamma radiation in the SPND current. In the steady-state mode of reactor operation, the current generated due to gamma-quanta is proportionate to the SPND current determined by its neutron response.

c) Fractional error determined by leakage currents (δ_{le})

The leakage current of SPND detectors is determined by the following equation

$$i_{le} = (i_0 + i_{cl})[1 - r / (r + R_S + R_l)]$$

and can be accounted for by entering the respective correction.

d) Fractional error determined by signal wire current (δ_{cl})

The correction on the current of the signal wire is entered by defining the current of the signal wire with the help of either a special background detector or by using background wires incorporated in the design of SPND detectors.

The measurement error in case of corrective action on signal wire current will be

$$\delta_{cl} = i_{cl}(\delta_{cl} + \delta) / (i - i_{cl})$$

For a case of using signal cable with twisted wires the error is determined only by insulation material of the signal wire and reproducibility of diameters of background and signal wires.

For the case of using a background detector it depends on the signal wire insulation material, reproducibility of diameters of background and signal wires, gradients of neutron flux density, gamma-quanta and electrons in places of location of background and signal wires and the conversion error which is determined by different lengths of background SPND and signal wire.

B.5 Recommended applications for SPNDs

SPNDs may be applied to perform the following types of monitoring:

- neutron flux density (power density) along the reactor core height and radius;
- automatic control of reactor power and their distribution along the core volume;
- automatic general and local reactor power protection;
- neutron noise applications.

B.6 Recommendations for designing SPNDs

SPND designs should ensure:

- maximum reliability and an adequate service life;
- minimization of measurement error;
- minimization of operations needed for detectors' maintenance by the user at NPP (exclusion of in-service calibration);
- verification of safe handling by personnel during SPND transportation and operation (minimize induced radioactivity of delivered SPNDs).

Il convient que le concepteur (fabricant) détermine les caractéristiques techniques exactes du collectron permettant de satisfaire toutes les exigences correspondant à une mesure donnée, par rapport aux critères suivants.

a) Matériau de l'émetteur

Il est recommandé que le matériau de l'émetteur assure la réponse maximale du collectron tout au long de sa vie, tout en minimisant le rapport entre les réponses gamma et neutronique. Faire fonctionner un collectron en mode transitoire nécessite de maximiser la composante instantanée de la réponse neutronique (c'est-à-dire la réponse neutronique d'un collectron Compton ou la composante Compton d'un collectron à activation).

b) Isolant du collectron

Il est recommandé que l'isolant du collectron soit aussi transparent que possible au passage des particules chargées émises par l'émetteur et qu'il offre une résistance électrique élevée aux faibles épaisseurs habituellement employées pour les collectrons installés dans un cœur de réacteur. Il convient que la technologie de fabrication de l'émetteur et de l'isolant garantisse une bonne reproductibilité de leurs dimensions et de leur densité, afin d'obtenir des lots homogènes.

c) Collecteur

Le collecteur, c'est-à-dire la deuxième électrode du collectron, est la pièce assurant l'étanchéité du collectron. Il convient de minimiser la quantité de particules chargées générées dans le collecteur et contribuant au courant du collectron.

d) Câble signal du collectron

Il est recommandé qu'un collectron soit équipé d'une âme et éventuellement d'un fil de compensation. Dans ce cas, il convient que les deux fils (signal et compensation) soient torsadés, avec une variabilité de diamètre minimale, et que l'âme et le fil de compensation soient du même matériau. Il n'est pas conseillé d'utiliser un câble signal et un câble de compensation indépendants.

En général, le MgO ou l' Al_2O_3 sont employés en tant qu'isolant du câble du collectron. L'utilisation du Al_2O_3 présente l'inconvénient de générer des courants de signal conséquents. Cette matière a cependant l'avantage de maintenir une résistance d'isolement importante lorsqu'elle est exposée aux températures élevées rencontrées dans le cœur.

Le principal inconvénient de MgO est sa résistance d'isolement relativement faible aux conditions d'exploitation. Son avantage réside dans le fait qu'il génère des courants nettement moins élevés dans le câble. Le matériau isolant est choisi par le concepteur dans un souci de minimiser l'erreur totale.

B.7 Fabrication

Il existe deux sortes de collectrons: les collectrons modulaires et les collectrons intégraux, qui se distinguent principalement par la méthode de fabrication.

a) Procédé de fabrication des collectrons modulaires

Le seul procédé de fabrication des collectrons modulaires consiste à fabriquer d'abord les deux éléments principaux (l'émetteur et le câble de transmission du signal) séparément puis de les souder ou de les braser ensemble. L'avantage de la conception modulaire réside dans la reproductibilité connue des dimensions géométriques de l'émetteur et de l'isolant, ainsi que de la densité de l'isolant, et la possibilité de contrôler ces variables au cours de la fabrication, afin de garantir la reproductibilité optimale au sein d'un lot de collectrons.

Precise design features of the SPND should be determined by the designer (manufacturer) based on the conditions of meeting all the requirements of the task set for a specific measurement with respect to the following:

a) Emitter material

The emitter material should ensure the maximum SPND response during the whole service life and also minimize the ratio of gamma response to neutron response. In order to operate an SPND in the transient mode, it is necessary to maximize the value of the prompt constituent of the neutron response (i.e. the neutron response of a Compton SPND or the Compton component of an activation type SPND).

b) SPND insulator

The SPND insulator should be as transparent as possible for the charged particles released by the emitter and provide for high electrical resistance at the restricted values of thickness typical of in-core type SPNDs. The technology of emitter and insulator fabrication should ensure good reproducibility of their dimensions and density to provide uniform SPND lots.

c) Collector

The collector, i.e. second SPND electrode, serves as the sealing element of the detector. The quantity of charged particles generated in the collector and contributing to the SPND current should be minimized.

d) SPND signal wire

The SPND signal wire should consist of one or two current conducting wires (signal and current conducting). The signal and current conducting wire should be twisted, the scattering of their diameters should be minimum, the conducting wire and sheath of signal wire should be produced from the same material. It is not advisable to use signal wire with one wire and individual background SPND.

Usually MgO or Al_2O_3 serve as the insulation of the SPND signal wire. A disadvantage of using Al_2O_3 is the generation of rather large signal currents. Its advantage is maintaining high insulation resistance under the high temperature operating conditions in the core.

The main disadvantage of using MgO is its rather low insulation resistance in service conditions. Its advantage is generating considerably smaller signal wire currents. The selection of the preferred insulation material is determined by the designer to minimize the total measurement error.

B.7 Fabrication

There are two types of SPNDs, namely modular and integral, which differ primarily by their method of fabrication.

a) Process in fabrication of modular SPNDs

The unique process in fabrication of modular SPNDs is to first make the two major elements (the emitter and signal lead sections) separately after which they are then connected with the help of welding or brazing. The advantage of the modular design is the possibility of providing a preset reproducibility of the geometrical dimensions of the emitter and insulator, as well as the density of the insulator and monitoring of these variables during fabrication, which ensures the optimum reproducibility of a lot of SPNDs.

b) Procédé de fabrication des collectrons intégraux

Le procédé de fabrication des collectrons intégraux consiste à fabriquer un demi-produit de plus grand diamètre, intégrant les composants du collectron, puis de le réduire mécaniquement jusqu'à ce qu'il atteigne les cotes spécifiées. Il se peut que l'épaisseur et la densité de l'isolant, ainsi que, dans certains cas, les dimensions géométriques de l'émetteur soit modifiées. Il est difficile de contrôler ces paramètres de façon précise, ce qui peut avoir comme conséquence de réduire la reproductibilité de réponse du lot de collectrons intégraux. Il est recommandé de prélever un échantillon statistique de chaque lot de fabrication de collectrons à câble intégral, puis d'effectuer un étalonnage des caractéristiques de réponse neutronique, afin de vérifier qu'ils sont conformes aux exigences d'homogénéité de réponse de l'application concernée.

B.8 Essais sur le collectron

Les essais sont effectués de la façon suivante.

a) Essais lors des phases de développement et de modernisation

Il convient d'effectuer des essais lors des phases de développement et de modernisation dans le but de déterminer et/ou de confirmer la conformité aux exigences citées dans la spécification technique relative aux collectrons et acceptées en tant que norme pour le lot. Il convient de déterminer toutes les caractéristiques des collectrons dépendant des conditions du cœur (durée de vie, fiabilité, résistance d'isolement, etc.) par le biais d'essais en réacteur en grandeur réelle. Les caractéristiques des mesures (réponses neutron et gamma, dispersion de réponse, épuisement du collectron, valeur des réponses neutron et gamma du câble) peuvent être déterminées à l'aide de réacteurs de recherche ou autres installations expérimentales.

NOTE 1 Dans certains cas justifiés, il est possible d'utiliser des résultats obtenus lors du développement de détecteurs ayant une conception similaire, obtenus lors d'analyses avérées par une expérience. Il est également possible d'utiliser des données figurant dans les spécifications techniques relatives aux matériaux et aux pièces, etc.

NOTE 2 Il convient d'étayer statistiquement les essais de fiabilité.

NOTE 3 Lors de la détermination des caractéristiques métrologiques, il est nécessaire d'assurer la conformité des prototypes testés aux collectrons de série.

b) Essais en production

Des essais en production doivent être effectués de manière à garantir la conformité à toutes les exigences établies dans la spécification technique. Le fabricant et les responsables du développement des collectrons doivent déterminer le champ d'application des essais, et il convient de vérifier que toutes les exigences établies dans la documentation technique sont satisfaites lors de l'exploitation. Les réponses gamma et neutron du collectron, ainsi que leur diffusion maximale doivent être confirmées.

Parmi les méthodes permettant de confirmer la réponse absolue du collectron et sa variation figurent les suivantes.

- La technologie de fabrication des détecteurs permet une reproductibilité des paramètres. Il convient de justifier les paramètres, ainsi que les valeurs limites de leur variation lors de la recherche et développement des collecteurs.
- L'étalonnage de tous les détecteurs du lot, ou d'un échantillon statistique du lot de fabrication, doit permettre d'obtenir des résultats avec un indice de confiance égal ou supérieur à 0,99. Il convient que l'erreur d'étalonnage maximale ne dépasse pas 1/3 de la variation moyenne des réponses du lot.

b) Production process of manufacturing integral SPNDs

The production process of manufacturing integral SPNDs is based on the preparation of a larger diameter semi-product, incorporating the SPND components with the subsequent mechanical reduction of its overall dimensions to prescribed values. In this case, the thickness and density of the insulation as well as, in certain cases, the geometrical dimensions of the emitter may be altered. The possibility of monitoring these parameters with adequate accuracy is difficult which may lead to the worse reproducibility of response of the lot of production integral SPNDs. It is recommended that a statistical sample of each production lot of integral cable SPNDs be calibrated for their neutron response characteristics to ensure they meet the specific application's uniformity of response requirements.

B.8 SPND tests

The tests are carried out as follows.

a) Tests during development and modernization

Tests during development and modernization should be conducted to determine and/or confirm requirements given in the technical specification for SPNDs accepted for the batch as a standard. All SPND characteristics dependent on in-core conditions (service life, reliability, insulation resistance, etc.) should be determined during full-scale reactor tests. Metrological characteristics (neutron and gamma response, scattering of response, SPND burn-up, neutron and gamma response values of signal wires) may be determined using research reactors or other experimental installations.

NOTE 1 In well-founded case results may be used that were obtained either during development of detectors having a similar design, analysis confirmed by an experiment, data of technical specifications on materials and parts, etc.

NOTE 2 Reliability tests should be substantiated statistically.

NOTE 3 While determining metrological characteristics it is necessary to ensure conformity of the tested prototypes with the production SPNDs.

b) Production tests

Production tests shall be conducted to ensure that all the requirements established in the technical specifications have been met. The scope of testing shall be determined by the developer and manufacturer of the SPNDs, and it should ensure that all requirements established in technical documents are met during operation. SPND neutron response and gamma response and their maximum scattering shall be confirmed.

Methods used to confirm the SPND absolute response and its variation may include the following.

- Technology of detectors manufacture providing for reproducibility of parameters. The parameters and the limit values of their change should be substantiated during the research and development of the detectors.
- The calibration of all detectors in the batch or a statistical sample of the production batch providing for results with credible probability not less than 0,99. The maximum calibration error should not exceed 1/3 of the average variation of response in the batch.

Matériau de l'émetteur		Vanadium	Rhodium			HfO ₂
Diamètre de l'émetteur (mm)		0,8	0,5	0,8	1,0	1,5
Longueur de l'émetteur (mm)		100, 200, 250, 300, 400, 500				1750, 7000
Matériau de l'isolant		SiO ₂				MgO
Matériau du collecteur		Alliage base nickel				Alliage base nickel
Diamètre du collecteur (mm)		1,8	1,5	1,8	2,0	3,0
Sensibilité initiale à la densité spécifique de flux neutronique pour 1 m émetteur, 10 ⁻²⁴ (A·m ² ·s)	Total	1,3	12,0	19,0	25,0	1
	Activation	1,24	11,3	17,4	22,5	
	Activation déterminée par formation directe de Rh ¹⁰⁴	—	10,4	16,0	20,7	
	Activation déterminée par formation directe de Rh ^{104m}	—	0,9	1,4	1,8	
	Compton	0,06	0,7	1,6	2,5	1
Fluctuation maximale de la sensibilité initiale (%)		1	1	1	1	3 ^a
Variation de la sensibilité due à l'épuisement du matériau de l'émetteur (% / (A·s))		0,046	0,082	0,044	0,039	
Sensibilité au débit de dose de Co ⁶⁰ absorbé, 10 ⁻¹⁰ (A·s / Gr)		0,08	0,8	1,5	1,9	
Fluctuation de la sensibilité au débit de dose absorbé de radioactivité γ de Co ⁶⁰ (%)		2	2	2	2	
Liaison câblée		Câble à deux fils torsadés				Câble unifilaire
Diamètre (mm)		1,0; 1,5				1,5
Matériau du câble (fil et gaine)		Alliage base nickel				Alliage base nickel
Matériau de l'isolant		MgO; Al ₂ O ₃				MgO
Reproductibilité maximale de la sensibilité du signal et du bruit du cœur (%)		10				

^a au sein d'un assemblage

B.9 SPND calibration

The calibration is conducted with the aim of determining the absolute value of a SPND response.

Calibration should be carried out with an error ensuring reception and/or confirmation of parameters given by the detector's technical specification. The maximum error of calibration should be specified.

a) Calibration in the process of fabrication

It is performed with the aim of determining deviation of neutron response from the value accepted as a standard, when manufacturing technology does not ensure reproducibility of neutron sensitivity.

NOTE SPNDs become radioactive after the in-fabrication neutron calibration and demand careful handling in conformity with codes of radiation safety.

b) In-service calibration

It should be conducted to determine the actual value of neutron response, when techniques of entering the burn-up correction with adequate accuracy based on SPND indications are missing. The intervals between the in-service calibrations should ensure determination of SPND response with an accuracy demanded by requirements of the applicable technical specification.

Table B.1 gives SPND characteristics.

Table B.1 – SPND characteristics

Emitter material		Vanadium	Rhodium			HfO ₂
Emitter diameter (mm)		0,8	0,5	0,8	1,0	1,5
Emitter length (mm)		100, 200, 250, 300, 400, 500				1750, 7000
Insulator material		SiO ₂				MgO
Collector material		Nickel based alloy				Nickel based alloy
Collector diameter (mm)		1,8	1,5	1,8	2,0	3,0
Initial sensitivity to specific neutron flux density per 1 m emitter, 10 ⁻²⁴ (A·m ² ·s)	Total	1,3	12,0	19,0	25,0	1
	Activation	1,24	11,3	17,4	22,5	
	Activation which is determined by direct Rh ¹⁰⁴ formation	—	10,4	16,0	20,7	
	Activation which is determined by direct Rh ^{104m} formation	—	0,9	1,4	1,8	
	Compton	0,06	0,7	1,6	2,5	1
Maximum fluctuation of initial sensitivity (%)		1	1	1	1	3 ^a
Change of sensitivity due to emitter material burnout (% / (A·s))		0,046	0,082	0,044	0,039	
Sensitivity to absorbed dose rate Co ⁶⁰ , 10 ⁻¹⁰ (A·s / Gr)		0,08	0,8	1,5	1,9	
Fluctuation of sensitivity to absorbed dose rate of γ-radiation Co ⁶⁰ (%)		2	2	2	2	
Connective lines		Cable with two twisting wires				Cable with one wire
Diameter (mm)		1,0; 1,5				1,5
Cable Material (wire and cover)		Nickel based alloy				Nickel based alloy
Insulator material		MgO; Al ₂ O ₃				MgO
Maximum reproducibility of sensitivity of the signal and background core (%)		10				

^a Within one assembly.

B.10 Ensembles de collectrons

Dans les réacteurs russes de production d'énergie, les collectrons sont utilisés dans des assemblages d'instrumentation interne en cœur (EC).

B.10.1 Ensembles EC utilisés dans les réacteurs VVER (REP)

Les ensembles EC utilisés dans les réacteurs VVER (REP) sont installés dans le circuit primaire et comportent 7 collectrons de type rhodium répartis axialement le long du cœur. Les diamètres des émetteurs en rhodium sont de 0,5 mm et de 1,0 mm, associés à des longueurs de 100 mm, 200 mm et 250 mm, respectivement. Chaque collectron est équipé d'un fil de compensation indépendant, les fils du signal et de compensation étant torsadés ensemble. La conception de tous les assemblages protège les collectrons de toute influence mutuelle, à l'aide d'une séparation mécanique. Une pénétration étanche constitue une barrière secondaire, en plus de la barrière de pression primaire. La longueur des ensembles varie de 10 m à 12 m, avec un diamètre extérieur de 7,5 mm dans les limites du cœur. Tous les assemblages sont conçus pour résister aux conditions de perte de réfrigérant primaire.

Les ensembles EC contrôlent non seulement la densité du flux neutronique (densité de puissance) mais aussi:

- la température du réfrigérant à l'entrée et la sortie de l'ensemble combustible, ainsi qu'aux internes supérieurs de l'intérieur du réacteur;
- la température du réacteur (cœur) en mode accident;
- le débit du réfrigérant par ensemble combustible;
- Le niveau de réfrigérant dans la cuve du réacteur.

Un assemblage de mesure EC (Sigles KNIK ou SVRD) est équipé d'une voie permettant l'étalonnage des collectrons intégrés.

Les Tableaux B.2 et B.3 rappellent les fonctions et la composition des ensembles EC et SVRD conçus pour les réacteurs VVER et RBMK.

Tableau B.2 – Fonctions et composition des ensembles EC conçus pour réacteurs VVER

EC	Pièces collectron	Température réfrigérant, nombre de points contrôle, pièces			Température accident	Niveau réfrigérant, nombre de points de contrôle, pièces	Débit réfrigérant
		Sortie ensemble combustible	Haut de cuve	Entrée ensemble combustible			
KNI	7	Non	Non	Non	Non	Non	Non
KNIT	7	1	Non	Non	Oui	Oui	Oui
KNITT	7	1	1	Non	Oui	Non	Oui
KNIT2T	7	1	1	1	Oui	Non	Oui
KNITU	7	1	1	Non	Oui	3	Oui
KNIK	7	Non	Non	Non	Non	Non	Non

NOTE 1 La température des soudures froides des thermocouples est mesurée dans les IC à l'aide d'un thermomètre à résistance (TR).

NOTE 2 Les réacteurs VVER 440 KNI présentent des collectrons modifiés, sans fil de bruit indépendant, mais possédant un détecteur à bruit indépendant.

SVRD. KNIK assembly is equipped with a calibration channel for calibration of the incorporated SPNDs.

B.10.2 Ensembles SVRD pour réacteurs à uranium-graphite (RBMK)

Les ensembles sont installés dans la voie sèche du réacteur et équipés d'une gaine en acier inoxydable. La longueur de la partie de la pièce destinée à être immergée est de 15,93 m. L'ensemble comprend également un connecteur électrique adapté aux températures élevées. La conception du réacteur permet le remplacement des ensembles SVRD pendant l'exploitation du réacteur.

Table B.3 – Fonction et composition des ensembles SVRD conçus pour les réacteurs RBMK

SVRD	Collectron			
	Quantité de pièces	Matériau de l'émetteur	Longueur de l'émetteur mm	Diamètre de l'émetteur mm
DT.4	1	HfO ₂	7 000	1,5
DT.14	4	HfO ₂	1 750	1,5
KNI-7	7	Rh	300	0,5

Les ensembles DT.4 et DT.14 utilisent des collectrons Compton de type câble avec émetteur à HfO₂. La longueur de l'émetteur du DT.4 correspond à la hauteur du cœur.

Afin de réduire les différentes influences sur la mesure du signal, chaque collectron de l'ensemble DT.14 est équipé d'une série de tronçons de câble interconnectés, de la partie inférieure de l'émetteur jusqu'à la partie inférieure du cœur.

Chaque collectron intégré dans l'ensemble KNI-7 possède un fil de compensation indépendant permettant la correction du courant de la ligne de communication (le fil conducteur et le fil de bruit sont torsadés ensemble). Cela permet d'empêcher les interférences entre les collectrons.

Les Figures B.2 et B.3 représentent les EC KNITU-5 et KNI-7 conçus pour les réacteurs VVER et les Figures B.4 et B.5 représentent les EC DT.4 et DT.14 conçus pour les réacteurs RBMK.