

# TRANSFORMATEUR

## 1 Constitution

## 2 Repérages et notations

## 3 Couplage des transformateurs

## 4 Rapport de transformation

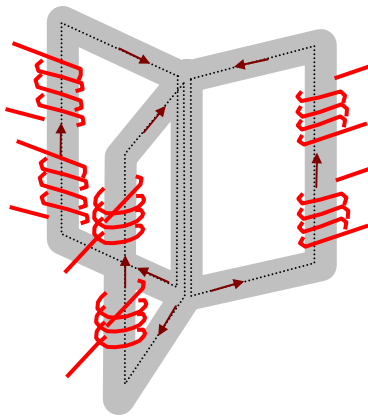
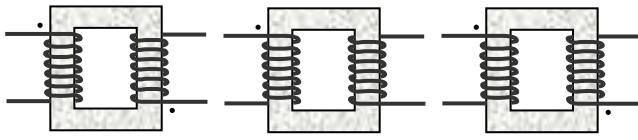
## 5 Indice horaire

## 6 Schéma équivalent - Chute de tension en charge

## 7 Marche en parallèle de plusieurs transformateurs

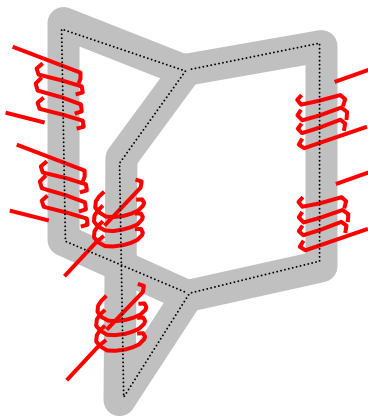
## 1. Constitution

On pourrait construire un transformateur triphasé à l'aide de trois transformateurs monophasés. Cependant la masse totale de fer et l'encombrement seraient trop grands.



La mise en commun d'un noyau permet de réduire la masse totale de fer.

En régime équilibré, le flux au travers du noyau central est nul puisqu'il est la composition de trois flux équilibrés. Ce noyau n'est donc pas nécessaire.

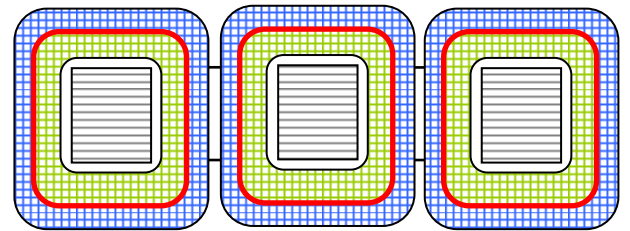
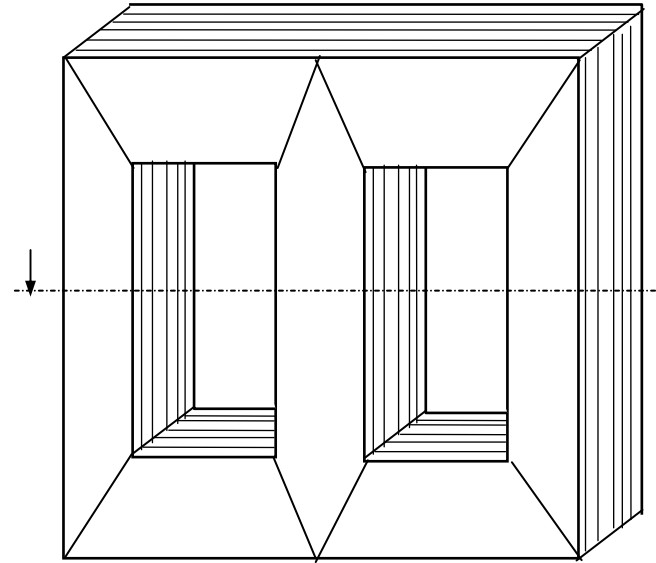


La disposition « en trois D », bien que symétrique, donne à un tel transformateur un encombrement trop important. Aussi, préfère-t-on réaliser une carcasse dont les trois noyaux sont coplanaires. (« 2D »)

Cette disposition, moins encombrante, n'est plus symétrique. La réluctance du circuit magnétique

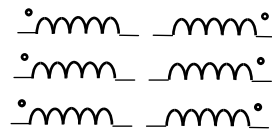
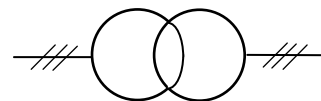
vue par chaque bobine diffère suivant la colonne considérée.

Circuit magnétique du transformateur triphasé



*Remarque :* Il existe des circuits magnétiques plus complexes à 5 voire 6 colonnes (type cuirassé). Les colonnes supplémentaires ne portent pas de bobinage mais sont là pour équilibrer les flux lors de la marche en régime de charge déséquilibrée.

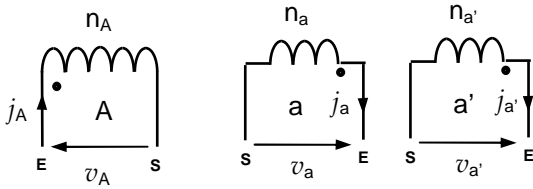
Les symboles permettant de représenter un transformateur sont les suivants :



## 2. Repérages et notations

Afin de simplifier le graphisme, il est plus simple d'adopter une représentation schématique.

Les conventions habituelles sont les suivantes :



Les trois colonnes portent les noms de *A, B, C*.  
Le dessin ci-dessus correspond à la colonne *A*,  
les deux autres sont similaires la lettre *A* étant  
remplacée par *B* ou *C*.

Les lettres majuscules sont réservées à la haute  
tension alors que les minuscules à la basse  
tension (basse et haute étant des termes  
relatifs).

Le point repère les bornes homologues. Un  
courant entrant par une borne repérée par un  
point crée un flux positif.

Les lettres cursives sont utilisées pour les  
valeurs instantanées, les lettres majuscules  
droites pour les valeurs efficaces; les  
majuscules soulignées correspondent aux  
nombres complexes associés.

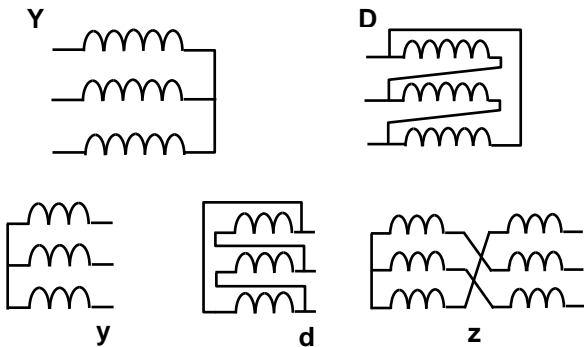
La convention **Récepteur** est adoptée pour  
l'orientation du **primaire** et celle **Générateur**  
pour le **secondaire**.

$v$  et  $j$  sont réservées aux valeurs simples,  $u$  aux  
valeurs composées et  $i$  au courant de ligne.

### 3. Couplages

Comme tout récepteur triphasé, le primaire  
pourra être couplé en étoile (*Y*) ou en triangle  
(*D*). Le secondaire, quant à lui, peut être couplé  
en étoile (*y*) ou en triangle (*d*), mais également  
en Zigzag (*z*).

Comme nous l'avons fait en monophasé, rappelons  
que les transformateurs en plus grand nombre  
sont de type « abaisseur »



Il y a donc, en principe, deux possibilités au  
primaire et trois au secondaire (le Zigzag  
primaire n'est pas fréquent).

primaire secondaire	Étoile	Triangle
Étoile	Yy	Dy
Triangle	Yd	Dd
Zigzag	Yz	Dz

Les couplages **Étoile-étoile**, **Triangle-étoile** et **Étoile-Zigzag** sont les couplages normalisés.

Les critères généraux qui permettent de justifier tel ou tel autre couplage s'appuient sur le fait que :

- Aux très hautes tensions, il vaut mieux utiliser un couplage étoile afin de réduire la tension supportée par chaque bobine.
- Pour les très forts courants, le montage triangle est préférable afin de réduire le courant par bobine.
- Le montage triangle est à éviter au secondaire afin d'éviter les courants de circulation dus à une légère dissemblance des bobines.
- Lorsque la charge risque d'être déséquilibrée, il vaut mieux utiliser
  - un  $Yy_n$  (l'indice n signifiant que le neutre est disponible) si  $I_N < 10\% I$  ;
  - un  $Yz_n$  si le déséquilibre est plus fort ;
  - un  $DY_n$  pour les très forts déséquilibres et un poids de cuivre limité.

#### 4. Rapport de transformation

Comme en monophasé, le rapport de transformation est le rapport des tensions à circuit secondaire ouvert.

$$m = \frac{U_{S0}}{U_{P0}} = \frac{V_{S0}}{V_{P0}} \quad (I_S = 0)$$

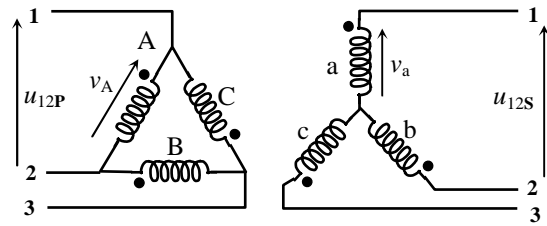
Il s'obtient lors de l'essai à circuit secondaire ouvert.

La valeur est la même que l'on prenne les deux tensions simples ou les deux tensions composées (mais pas un mélange composée et simple).

Alors qu'en monophasé « m » valait également le rapport des nombres de spires, en triphasé, il faut également tenir compte du couplage.

La loi de Faraday permet d'établir que le rapport

des tensions de deux bobines est bien le rapport des nombres de spires, mais une bobine ne donne pas forcément la tension entre phases.



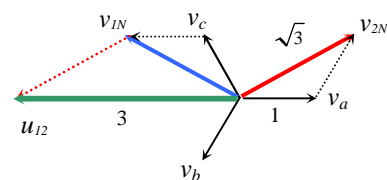
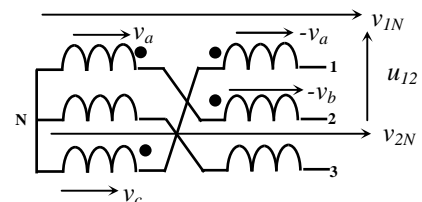
$$\frac{V_a}{V_A} = \frac{n_a}{n_A} \quad \text{mais } V_A = U_P \quad \text{et } V_a = V_S = \frac{U_S}{\sqrt{3}}$$

$$\text{ce qui donne : } m = \sqrt{3} \frac{n_a}{n_A}$$

Si  $n_p$  et  $n_s$  sont les nombres de spires par bobine du primaire et du secondaire (en Zigzag 2 fois  $n_s$  par phase) suivant les couplages nous aurons :

Rapports de transformation :

primaire secondaire	Étoile	Triangle
Étoile	$\frac{n_s}{n_p}$	$\sqrt{3} \frac{n_s}{n_p}$
Triangle	$\frac{1}{\sqrt{3}} \frac{n_s}{n_p}$	$\frac{n_s}{n_p}$
Zigzag	$\sqrt{3} \frac{n_s}{n_p}$	$3 \frac{n_s}{n_p}$



#### 5. Indice horaire

En monophasé, la tension secondaire ne pouvait être qu'en phase ou en opposition avec la tension primaire ; les bornes homologues étant repérées par un point.

En triphasé, la situation est plus complexe, il faut établir un diagramme de Fresnel complet pour connaître le déphasage entre une tension du primaire et une tension du secondaire.

On dit de deux tensions qu'elles sont **homologues** lorsqu'elles représentent la même grandeur mais l'une au primaire, l'autre au secondaire (il n'y a que le P et le S qui diffèrent  $U_{12S}$  et  $U_{12P}$  sont homologues de même que  $V_{3S}$  et  $V_{3P}$ ).

Les déphasages s'expriment entre deux tensions homologues et ils sont toujours un multiple de  $\frac{\pi}{6}$ , ce qui donne 12 possibilités.

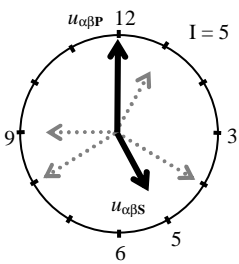
On note  $\theta$  le **retard** d'une tension côté basse tension (donc le plus souvent au secondaire) sur son homologue haute tension.

Ce retard peut aller de 0 à  $2\pi$  (une avance de  $60^\circ$  est un retard de  $300^\circ$ ).

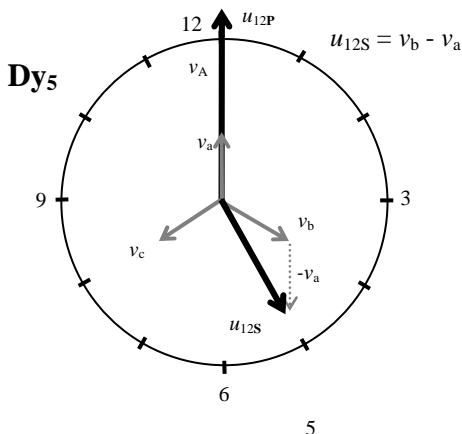
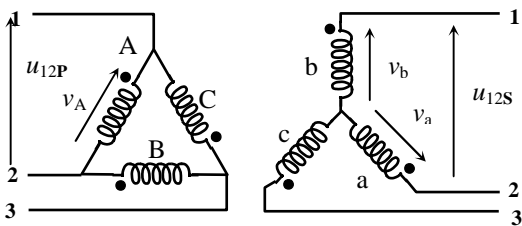
L'indice horaire est le rapport de  $\theta$  à  $\frac{\pi}{6}$

$$I = \frac{\theta}{\pi/6}$$

L'appellation « horaire » fait référence à l'heure qu'indiquerait une horloge à cadran dont la grande aiguille représenterait une tension côté HT pointant sur le 12 et la petite aiguille la tension homologue.



Par exemple pour le couplage ci-dessous :



## 6. Schéma équivalent - Chute de tension en charge

Le transformateur triphasé présente les mêmes défauts que son « cousin » monophasé, à savoir :

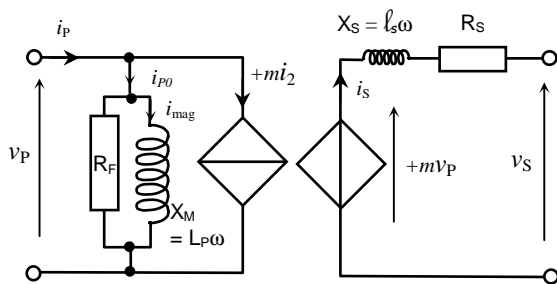
- les fils des enroulements ont une résistance non nulle ;
- les variations du flux dans la masse ferromagnétique provoquent des pertes par hystérésis et par courants de Foucault ;
- la perméabilité du matériau magnétique n'est pas infinie et il faut donc un courant magnétisant pour assurer le flux dans la carcasse.
- le couplage magnétique entre le primaire et le secondaire n'est pas parfait, il y a donc des fuites magnétiques.

On peut donc établir un schéma équivalent « naturel » du transformateur en faisant apparaître, pour chaque défaut, un composant spécifique.

Cela conduirait à un schéma assez complexe qui devrait tenir compte, en plus, du couplage du transformateur. (modèle du transformateur « colonne »).

Il est préférable (et beaucoup plus simple) de raisonner globalement et d'établir le **schéma équivalent de Thévenin** du transformateur, vu du secondaire et pour une phase.

On fait de même au primaire (il s'agit alors du schéma équivalent de Norton).

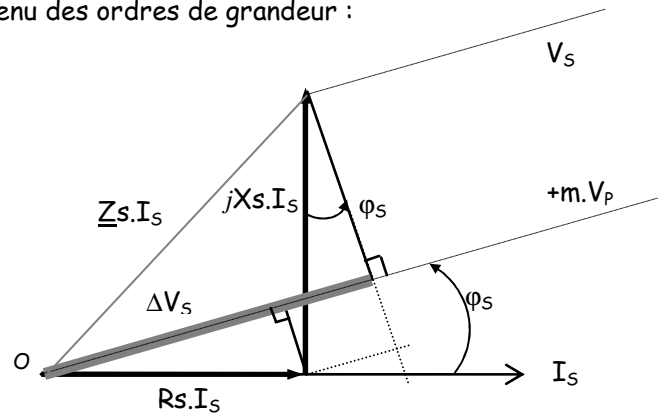


Pour une phase du transformateur

Peu importe alors le couplage réel du transformateur. Il n'y a que pour le couplage étoile-étoile que cette représentation se rapproche de la réalité. Dans les autres cas ce n'est qu'un modèle équivalent qui permet de faire des calculs.

De la même façon que nous l'avons fait en monophasé, nous pouvons calculer la chute de tension au secondaire produite par l'impédance interne  $Z_s$ .

En établissant le diagramme de Fresnel correspondant à la maille secondaire et compte tenu des ordres de grandeur :



donc avec les mêmes simplifications nous aurons :

$$\Delta V_s = R_s \cdot I_s \cdot \cos \varphi_s + X_s \cdot I_s \cdot \sin \varphi_s$$

La chute de tension entre phases s'écrira alors :

$$\Delta U_s = \sqrt{3} \Delta V_s$$

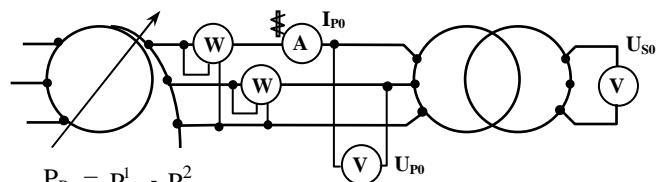
Ainsi la tension  $U_s$  aura, en charge, une valeur efficace qui pourra être calculée par :

$$U_s = U_{s0} - \Delta U_s = mU_p - \Delta U_s = mU_p - \sqrt{3} \Delta V_s$$

Cette chute de tension reste assez faible pour les gros transformateurs, elle s'exprime souvent en pourcentage de la tension secondaire à circuit ouvert (ou de la tension secondaire nominale).

Les éléments du schéma équivalent se déterminent eux aussi à partir de deux essais à puissance réduite :

L'essai à circuit secondaire ouvert.



$$P_{p0} = P_{13}^1 - P_{23}^2$$

$$Q_{p0} = \sqrt{3} (P_{13}^1 - P_{23}^2)$$

Il est réalisé sous tension primaire nominale  $U_{p0} = U_{PN}$  et permet de déterminer  $U_{s0}$ ,  $P_{p0}$  et  $I_{p0}$ . De cet essai on peut déduire :

Le rapport de transformation  $m = \frac{U_{s0}}{U_{p0}}$

Les pertes fer :  $P_{fer} = P_{p0}$

Le facteur de puissance à vide

$$\cos \varphi_{Po} = \frac{P_{Po}}{\sqrt{3}U_{Po}I_{Po}}$$

La connaissance de  $\varphi_{Po}$  permet de décomposer le courant en une partie active

$$I_{ao} = I_{Po} \cos \varphi_{Po} = \frac{P_{Po}}{\sqrt{3}U_{Po}}$$

et une partie réactive

$$I_{ro} = I_{Po} \sin \varphi_{Po} = \frac{Q_{Po}}{\sqrt{3}U_{Po}} = I_{mag}$$

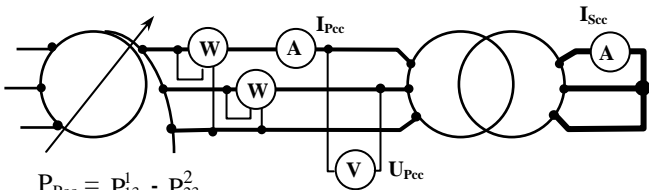
qui est le courant magnétisant.

Ces deux composantes donnant ensuite la résistance équivalente aux pertes fer

$$R_F = \frac{V_{Po}}{I_{ao}} = \frac{U_{Po}}{\sqrt{3}I_{ao}} \text{ et}$$

$$\text{la réactance magnétisante } X_M = \frac{V_{Po}}{I_{ro}} = \frac{U_{Po}}{\sqrt{3}I_{ro}}$$

L'essai à circuit secondaire en court-circuit.



$$P_{Pcc} = P_{13}^1 - P_{23}^2$$

$$Q_{Pcc} = \sqrt{3} (P_{13}^1 - P_{23}^2)$$

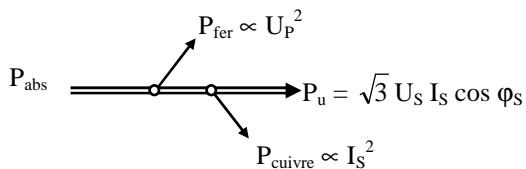
Il est réalisé à courant secondaire nominal,  $I_{Scc} = I_{SN}$  **mais sous tension primaire réduite !!!**

Il permet de déterminer  $U_{Pcc}$ ,  $I_{Pcc}$ ,  $P_{Pcc}$  et on peut ensuite en déduire :

$$R_S = \frac{P_{Pcc}}{3 I_{Scc}^2} \quad Z_S = \frac{m U_{Pcc}}{\sqrt{3} I_{Scc}} \quad X_S = \sqrt{Z_S^2 - R_S^2}$$

## 7. Rendement

Comme pour le monophasé, le partage de la puissance absorbée se fait suivant « l'arbre des puissances » suivant :



$$\text{Le rendement s'obtient par } \eta = \frac{P_u}{P_u + P_{pertes}}$$

Les pertes se décomposent en :

- pertes fer, proportionnelles au carré de la tension primaire qui sont constantes si  $U_p$  l'est aussi
- pertes cuivre, proportionnelles au carré du courant secondaire.

Comme en monophasé, la courbe des variations du rendement passe par un maximum pour le courant secondaire optimal. (cf. transfo mono).

C'est à dire lorsque  $P_{P0} = 3 R_S I_S^2$  ou encore

$$P_{fer} = P_{cuivre}$$

Le rendement maximum vaudra donc

$$\eta_{max} = \frac{P_{uopt}}{P_{uopt} + 2P_{P0}} \text{ lorsque le courant } I_S \text{ vaut}$$

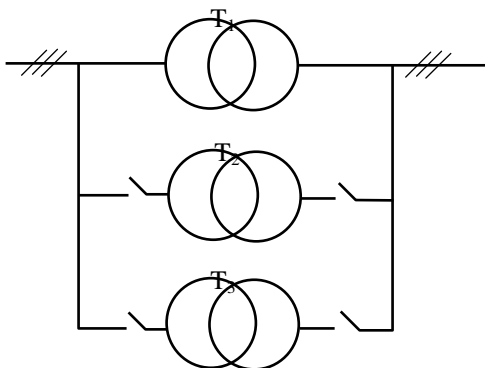
$$I_{Sopt} = \sqrt{\frac{P_{P0}}{3R_S}}$$

## 8. Marche en parallèle de plusieurs transformateurs

Il est fréquent que l'on ait à faire fonctionner plusieurs transformateurs triphasés en parallèle :

- Soit parce que la consommation d'une installation s'est accrue au cours du temps et qu'il faille augmenter la puissance du transformateur d'alimentation générale ;
- Soit parce que la consommation fluctuant (le long de la journée, de la semaine, de l'année) on veut rester le plus souvent au voisinage du rendement optimum ;
- Soit parce qu'on veut réaliser un réseau « maillé ».

On dit de deux transformateurs qu'ils sont en parallèle s'ils ont leurs primaires et leurs secondaires en parallèle.



Pour que le couplage soit envisageable il faut impérativement que les transformateurs aient :

- **Même rapports de transformation ;**
- **Même indices horaires.**

Si ce n'était pas le cas, des courants de circulation prendraient naissance entre les transformateurs qui s'échaufferaient dangereusement.

Les conditions de couplage étant réalisées, il est aisé de démontrer que :

- Les chutes de tensions aux bornes des impédances ramenées au secondaires sont égales.
- La répartition des puissances se fait en raison inverse des impédances ramenées au secondaire.

Plutôt que donner les valeurs des chutes de tensions dans l'absolu, les constructeurs les indiquent souvent en valeurs relatives aux valeurs nominales. Ce sont des « **grandeurs réduites** », exprimées en% (des valeurs nominales) ainsi parlera-t-on de :

- Chute de tension au secondaire

$$\Delta U_{S\%} = \frac{U_{S0} - U_{Sn}}{U_{Sn}}$$

- Tension réduite de court-circuit

$$U_{Pcc\%} = \frac{U_{Pcc}}{U_{Pn}}$$

- Chute de tension ohmique

$$R_S I_{S\%} = \frac{R_S I_{Sn}}{U_{Sn}}$$

- Chute de tension inductive

$$X_S I_{S\%} = \frac{X_S I_{Sn}}{U_{Sn}}$$

- Impédance secondaire

$$Z_{S\%} = \frac{Z_S I_{Sn}}{V_{Sn}}$$

Ce qui donne par exemple :

$$\Delta V_{S\%} = (R_S I_{S\%} \cos \varphi_S + X_S I_{S\%} \sin \varphi_S) \frac{I_S}{I_{Sn}}$$