

Chapitre 5

Le bilan électroénergétique

5.1. Problèmes généraux

Le bilan énergétique est une méthode d'analyse des procès de conversion de l'énergie qui veut mettre en évidence les composantes utiles et les pertes d'énergie qui entrent dans le contour d'un procès énérgo-technologique.

Le procès énérgo-technologique (technologique) se caractérise par le fait que l'énergie passe d'une forme à l'autre, d'un niveau à l'autre ou d'un porteur à l'autre. Le procès technologique élémentaire est le phénomène physique ou chimique le plus simple qui se déroule en consommant de l'énergie. Le procès technologique complexe a plusieurs étapes de déroulement qui consistent dans une série de processus technologiques élémentaires.

Le procès énérgo-intensif est le procès technologique qui a comme but la réalisation d'un produit énérgo-intensif. On y inclut les processus d'électrolyse, d'élaboration des métaux dans des fours électriques; d'élaboration des ferroalliages; de laminage des métaux; de traitements thermiques par voie électrique; de couvertures galvaniques; d'obtention de l'air comprimé ou du ciment par voie électrique.

Le processus de consommation finale d'énergie est celui dans lequel l'énergie sert à la réalisation de produits non énergétiques ou à des prestations de services. Après ce processus, les transformations énergétiques s'arrêtent. On mentionne que les transports de marchandises, de combustibles ou d'énergie électrique ne sont pas des processus de consommation finale d'énergie.

Les bilans énergétiques, conformément au normatifs en vigueur, se classifient selon:

- *le contour d'étendue*: bilans par équipement, installation, service, usine ou entreprise;
- *le type d'énergie*: bilans thermo et électroénergétiques;
- *la nature des porteurs d'énergie*: bilans par combustibles, vapeurs et utilités. Les bilans par utilités sont des bilans de masse et se réfèrent à l'eau de refroidissement, à l'air comprimé, à l'azote, aux autres matériaux ayant le rôle de porteur d'énergie;
- *le nombre des formes d'énergie*: bilans simples (thermo ou électroénergétiques) et totaux (thermo et électroénergétiques);
- *le contenu et l'étape d'élaboration*: bilans de projet, d'homologation, de réception, réels et optimisés;

- l'aspect du flux d'énergie: bilans qualitatifs (énergétiques) et quantitatifs.

Quant au contenu et l'étape d'élaboration d'un bilan certaines précisions s'imposent:

Le bilan de projet utilise comme éléments énergétiques de calcul les dimensions adoptées par le projet et c'est le document sur la base duquel on obtient l'avis énergétique pour l'introduction de l'équipement dans les projets des travaux d'investissement. Les valeurs des paramètres technologiques et énergétiques adoptés deviennent des valeurs de référence pour le constructeur d'équipement.

Le bilan d'homologation a comme but de confirmer la réalisation effective des paramètres énergétiques prévus dans le projet. Les valeurs des paramètres résultats des essais d'homologation deviennent des valeurs de référence pour le bilan de réception.

Le bilan de réception se fait pour les conditions réelles de réalisation de l'équipement ou de l'installation. Au même moment, on établit les courbes de correction pour les déviations des valeurs nominales et le bilan de réception devient un bilan de référence pour les bilans réels.

Les essais de fonctionnement et les mesures de bilan se font pour plusieurs niveaux de charge de l'équipement (minimum trois) dont l'un représente la charge nominale. Les valeurs de référence sont inscrites dans le livre technique de l'équipement.

Le bilan réel valide la maintenance des paramètres technologiques et de l'équipement aux valeurs de référence. Il met aussi en évidence les causes des déviations et les mesures qui doivent être prises.

Ce type de bilan s'élabore en opérant avec certaines quantités d'énergie mesurées, complétés avec des valeurs déduites analytiquement. Les mesurages seront faits à des charges égales ou approximativement égales avec les charges nominales. Le bilan réel constitue la base d'élaboration du bilan optimisé et de l'inventaire des ressources énergétiques réutilisables.

Le bilan optimisé résulte du bilan réel par le calcul des mesures d'augmentation de l'efficacité énergétique de l'équipement identifiées par l'analyse du bilan réel. Si par l'application de ces mesures, les paramètres technologiques et énergétiques de l'équipement dépassent les paramètres de référence, ils deviennent des valeurs de référence et par conséquent on fait les modifications correspondantes dans le livre technique.

L'élaboration des bilans énergétiques est obligatoire pour tous les processus technologiques qui réalisent des biens matériels avec une consommation d'énergie de plus de 300 GJ/an, les résultats des calculs servant:

- au fondement scientifique des normes énergétiques de consommation;
- au fondement de l'inventaire des ressources énergétiques réutilisables, générées lors des prévisions du bilan;
- au fondement des mesures prises pour économiser les ressources énergétiques, pour moderniser les installations et pour augmenter les rendements;
- à l'établissement des quantités absolues et spécifiques d'énergie consommées, ou résultées, des processus;
- à l'établissement des quantités de masse et d'énergie qui quittent le processus à un niveau énergétique suffisamment élevé pour être réutilisées;
- à l'établissement des pertes d'énergie du processus, comme lieu et valeur;
- à l'estimation du niveau technique et énergétique du processus examiné.

Les périodes d'élaboration des bilans réels et optimisés sont:

- au niveau des équipements et des installations tous les 2 ans et chaque fois que ceux-ci ont souffert des modifications constructives ou fonctionnelles;
- au niveau des sections, des usines ou des entreprises tous les 2 ans;
- autrement, les bilans se confirment ou, selon le cas, s'actualisent par l'introduction des effets des mesures appliquées.

La limite maximale d'erreur (la non fermeture du bilan), quoi que ce soit le type de bilan, sera de $\pm 2,5\%$ quand les principales mesures se déterminent par des mesurages directs (méthode recommandée) et de $\pm 5\%$ dans le cas des bilans dont quelques mesurages ne peuvent pas être effectués directement et se déduisent par les mesurages des autres mesures (déterminations indirectes).

Les éléments nécessaires pour un bilan énergétique sont fournis par: les mesurages effectués spécialement; les éléments statistiques résultats des mesurages d'exploitation courante depuis la période antérieure de l'élaboration du bilan; les données de la littérature de spécialité et des documentations techniques qui se réfèrent à l'équipement qui fait l'objet du bilan; les calculs analytiques.

À l'aide de ces données on passe à l'élaboration du bilan énergétique dont l'équation générale reflète le principe de la conservation de l'énergie:

$$\sum E_i = \sum E_u + \sum \Delta E_p \quad (5.1.)$$

où tous les éléments composants sont exprimés en l'équivalent d'une seule forme d'énergie et ont les significations suivantes:

E_i - l'énergie totale entrée dans le contour du profil:

- sous forme d'énergie chimique liée contenue dans le combustible consommé;
- sous forme d'énergie développée par les réactions exothermes du processus;
- sous forme de chaleur sensible de la matière première;
- sous forme de chaleur introduite avec des vapeurs et (ou) de l'eau chaude;
- sous forme d'agents thermiques qui entrent dans le contour;
- sous forme de chaleur contenue par les ressources énergétiques réutilisables qui appellent le processus, mais qui proviennent des autres contours;
- sous forme d'énergie électrique absorbée directement par le processus;
- sous forme d'énergie électrique ou mécanique utilisée dans contour indirectement par l'intermédiaire des utilités afférentes au processus.

E_u - l'énergie utile du processus, est considérée de la façon suivante:

- pour les actionnements électriques, la différence entre l'énergie absorbée du réseau et la somme des quantités représentant les pertes électromagnétiques et mécaniques du moteur d'entraînement appareillage propre au démarrage et à la régulation;
- pour les actionnements mécaniques, l'énergie équivalente pour le travail mécanique à l'arbre;
- pour les actionnements mécaniques des générateurs électriques, l'énergie aux bornes du générateur, moins l'énergie consommée par les services propres du groupe;
- pour les générateurs de vapeurs, l'énergie contenue par les vapeurs débitées dans le conduit, moins l'énergie équivalente absorbée par les services propres du générateur de vapeurs;
- pour les processus thermiques la chaleur nécessaire à l'échauffement, à la fusion, à la vaporisation, au séchage des matériaux etc., jusqu'aux paramètres exigés par les réseaux au processus technologique, ainsi que la chaleur absorbée par les réactions endothermiques ; de même que la chaleur sensible contenue dans les produits de fabrication qui se maintient à un niveau thermique prescrit par les normes internes de spécialité. Pour prévenir les incendies, les explosions, les blocages des installations, pour prévenir les accidents de travail;
- la chaleur contenue dans les ressources énergétiques réutilisables que le processus examiné met à la disposition des autres processus ; pour

les processus de transport de l'énergie contenue par le porteur à l'entrée dans le contour du consommateur;

- pour les éléments du réseau (lignés, transformateurs, bobines de réactance, etc.) l'énergie aux bornes situées en aval de l'élément considérée;

- pour les processus de soudure électrique, électroérosion, couvertures métalliques, etc., l'énergie aux bornes d'alimentation des électrodes;

- pour l'éclairage électrique, l'énergie du flux lumineux utile.

E_p - les pertes d'énergie électrique du processus considéré:

- la chaleur sensible contenue par les gaz de combustion ou technologiques, résultats du processus, à la température à laquelle ceux-ci quittent le processus ou l'installation de récupération des ressources énergétiques réutilisables;

- la chaleur non développée comme conséquence d'une combustion incomplète afférente au processus technologique;

- la chaleur perdue par la radiation des surfaces de l'équipement où a lieu le processus;

- la chaleur contenue dans les quantités de masse qui sont perdues par vaporisation, purgation, drainage, décantation, régulation etc., ou par les non étanchéités de l'installation;

- la chaleur sensible des vapeurs évacuées dans l'atmosphère par: les machines-outils, les machines thermiques à piston, les conduits d'accompagnement (maintenance de la chaleur) des tracés et des réservoirs de l'industrie chimique et similaires;

- la chaleur évacuée du processus par les agents de refroidissement, à la sortie du processus ou de l'installation de récupération;

- la chaleur sensible contenue dans les rebuts de fabrication, les déchets, les matériaux résultats du processus comme associés au produit proprement dit (scorie, cendres, poussières, ballast, masse inactive, etc.) ainsi que la chaleur sensible du produit à la sortie directe du processus ou du récupérateur de chaleur;

- la chaleur contenue par les ressources énergétiques réutilisables à la sortie du processus ou des installations de récupération;

- l'énergie électrique perdue par l'effet Joule-Lenz, l'effet corona, et les pertes électromagnétiques et mécaniques des moteurs.

L'appréciation de l'efficacité énergétique du processus énérgo-technologique se fait à l'aide des indicateurs suivants:

- **le rendement conventionnel de transformation énergétique du processus**, défini comme le rapport entre la somme des quantités

d'énergie consommées utilement et la somme des quantités d'énergie entrées dans le contour, sont exprimées par les mêmes unités:

$$\eta_{cte} = \sum E_u / E_i \quad (5.2.)$$

- *la consommation spécifique d'énergie par l'unité de produit*, établie par le rapport à la consommation d'énergie pour une période donnée et à la production physique réalisée dans le procès pour la même période

$$c_{sc} = \frac{\text{Le total de l'énergie entrée dans le processus}}{\text{Le total de la production fabriquée dans le processus}} \quad (5.3.)$$

Si dans le processus on consomme plusieurs formes d'énergie, la consommation s'établit tant pour chaque forme que pour le total, l'unité de mesure de l'énergie étant la tonne de combustible conventionnel.

5.2. Elaboration du bilan électroénergétique

La réalisation des bilans électroénergétiques (b.e.e.) des entreprises industrielles et similaires a comme but la connaissance la plus exacte que possible de la consommation d'énergie électrique en vue du perfectionnement de l'exploitation énergétique, par la limitation des pertes d'énergie, dans les conditions d'une alimentation sûre des consommateurs.

L'objectif principal d'un b.e.e. est: la détermination des composantes utiles et des pertes; la détermination des causes et des endroits où il y a des pertes importantes d'énergie électrique (qui dépassent les pertes normales); le calcul de ces pertes et la prévision des mesures techniques et d'organisation pour les réduire. À l'estimation des pertes il est nécessaire de connaître tant les caractéristiques structurales du schéma d'alimentation et de distribution de l'énergie électrique, que les flux d'énergie du schéma.

Les sources d'information nécessaires à l'élaboration du b.e.e. sont constituées par: les livres techniques des agrégats; les documentations des services technologiques et énergétiques; les documents (statistiques dans lesquels sont inscrits les résultats des différents mesurages, les informations de la littérature de spécialité). Ces données se complètent avec des mesurages effectués sur des échantillons caractéristiques pendant une certaine période de temps.

À l'élaboration de b.e.e. on doit connaître les éléments suivants:

- les schémas électriques mono filaires du consommateur, depuis l'entrée dans le contour jusqu'au dernier récepteur ou outillage;
- les caractéristiques des colonnes et des circuits (longueur et section des conducteurs, type constructif, mode d'exécution, etc.);
- les caractéristiques nominales des récepteurs et les temps de fonctionnement de la charge technologique;
- les caractéristiques des transformateurs de force, l'emplacement et le mode d'exploitation;
- les caractéristiques des batteries de condensateurs pour l'amélioration du facteur de puissance, l'emplacement, le régime de connexions (permanent, intermittent, manuel, automate);
- la liste des services de l'entreprise, avec la description du processus technologique et la précision du degré de charge des outillages, y inclus du nombre annuel d'heures de fonctionnement à la charge technologique;
- les courbes journalières et annuelles des charges actives et réactives, avec la mise en évidence de la charge maximale sur les trois huit de travail;
- le compte-rendu statistique (type E) de l'année précédente à l'élaboration du bilan électroénergétique;
- les constantes des appareils de mesure sur les tableaux de distribution.

Les mesurages nécessaires à l'élaboration du b.e.e. réel s'effectuent pendant les jours caractéristiques, qui sont des jours de travail au milieu de la semaine, quand tous les services travaillent normalement, leur alimentation avec de l'énergie électrique étant l'alimentation usuelle. La lecture des appareils se fait simultanément, aux intervalles de temps égaux, mais pas plus de 15 minutes. Pour les calculs ultérieurs il est nécessaire d'estimer les valeurs moyennes (x_m), les valeurs moyennes quadratique (x_{mp}) et les facteurs de forme (k_f) des charges mesurées:

$$\begin{cases} x_m = \frac{1}{2n} \left(x_0 + x_n + 2 \sum_{j=1}^{n-1} x_j \right) \\ x_{mp} = \sqrt{\frac{1}{n+1} \sum_{j=0}^n x_j^2} \\ k_f = \frac{x_{mp}}{x_m} \end{cases} \quad (5.4.)$$

où:

x_0, x_n - est la valeur de la charge électrique mesurée au début et à fin de la période « t »;

x_j -est la valeur de la charge au moment $t_j=t/n$, où « n » est le nombre des intervalles égaux comme durée.

Le bilan électroénergétique est élaboré de manière différenciée, en fonction de l'importance énergétique de l'équipement, et des possibilités d'effectuer des mesurages, pour les catégories d'équipement et d'installations suivantes:

- éléments de réseaux;
- récepteurs électriques usuels;
- installations dans lesquelles se déroulent les processus énergointensifs.

5.2.1. Détermination des composantes utiles et des pertes d'énergie électrique du contour d'un bilan électroénergétique

L'équation générale d'un b.e.e., ayant en vue le schéma électrique mono filaire de principe du consommateur (fig. 5.1.), a la forme:

$$\begin{cases} E_{aIT} = \Delta E_{aT} + \Delta E_{acTD} + \Delta E_{ai} = \Delta E_{aT} + \Delta E_{acTD} + \Delta E_{acm} + \Delta E_{am} \\ E_{rIT} = \Delta E_{rT} + \Delta E_{rcTD} + E_{ri} \end{cases} \quad (5.5.)$$

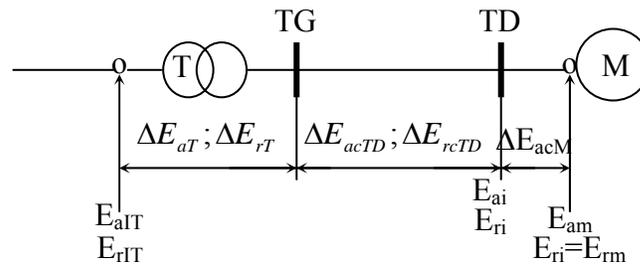


Fig. 5.1. Le schéma électrique mono filaire

où la signification des notations est la suivante:

E_{aIT}, E_{rIT} - est l'énergie active et réactive exigée par le consommateur du système, à l'endroit où il y a la haute tension du poste de transformation;

$\Delta E_{aT}, \Delta E_{rT}$ - les pertes d'énergie active dans les transformateurs (T) du poste de transformation;

$\Delta E_{acTD}, \Delta E_{rcTD}$ - les pertes d'énergie active et réactive sur les conducteurs des colonnes;

ΔE_{acm} - les pertes d'énergie active sur les conducteurs des circuits de récepteurs et d'outillage;

E_{ai} , E_{ri} - l'énergie active et réactive exigée par le récepteur ou l'outillage du tableau de distribution;

$E_{am} = E_{ai} - \Delta E_{acm}$ - l'énergie active aux bornes d'entrée du récepteur.

L'élaboration de b.e.e. réel se fait de manière différenciée, en fonction de l'élément du circuit analysé et dans ce qui suit on présente les étapes du calcul pour les situations fréquemment rencontrées dans la pratique.

Dans le cas des moteurs électriques, il est nécessaire de connaître:

- les données nominales: P_n , U_n , I_n , n_n , η_n , $\cos \varphi_n$;
- les données de fonctionnement en charge: P_{ms} , U_{ms} , I_{ms} ;
- les données connexes: T_f - durée quotidienne de fonctionnement en charge technologique;
- N , le nombre des récepteurs de même type;
- les caractéristiques du circuit d'alimentation.

Conformément aux normes en vigueur, les pertes d'énergie électrique dans le moteur électrique et l'outillage entraîné se déterminent globalement, la relation de calcul pour les moteurs asynchrones (avec $P_n \leq 100\text{kW}$) étant:

$$\Delta E_a = (1 - \eta_n) P_{ms} T_f \quad (5.6.)$$

où:

$\eta_s = \frac{\beta}{a + \beta + b\beta^2}$ - est le rendement du moteur à charge P_{ms} ;

$\beta = \eta_n \cdot P_{ms} / P_n$ - est le degré de chargement du moteur;

$$a = \frac{1}{3} [0,122 - 1,1\eta_n^{-1} + \eta_n^{-2}];$$

$$b = \frac{1}{3} [-3,122 + 4,1 \cdot \eta_n^{-1} - \eta_n^{-2}];$$

L'énergie utile consommée dans le processus technologique résulte de l'équation suivante:

$$E_{au} = E_{am} - \Delta E_a = P_{ms} T_f - (1 - \eta_s) P_{ms} T_f = \eta_s P_{ms} T_f \text{ [KW]} \quad (5.7.)$$

Si on veut mettre en évidence les pertes électriques dans le moteur (ΔE_{aCu}) et les pertes mécaniques ou en fer (ΔE_{aMF}) dans le moteur et dans l'outillage entraîné, alors il est nécessaire de connaître les données moyennes de marche à vide du moteur (P_{mo} , U_{mo} , I_{mo}), les calculs en étant effectués de la manière suivante:

- pertes d'énergie dans les enroulements du moteur électrique:

$$\Delta E_{aCu} = 3K_{fl}^2 \cdot I_{ms}^2 \cdot R_e \cdot T_f \cdot 10^{-3} \text{ [KW]} \quad (5.8.)$$

où on note par:

k_{fl} - le facteur de forme du courant;

R_e - la résistance équivalente par phase du moteur [ohm];

$R_e = R_{induit}$ - les moteurs de courant continu;

$R_e = R_{stator}$ - les moteurs synchrones;

$R_e = R_1 + R_2'$ - les moteurs asynchrones;

R_1 - la résistance par phase de l'enroulement statorique;

R_2' - la résistance par phase de l'enroulement du rotor rapporté au stator;

$R_2' = [0,98 \cdot U_1 / U_{21}]^2 R_2$ - les moteurs asynchrones à rotor bobiné;

R_2 - la résistance par phase de l'enroulement du rotor;

U_1 - la tension entre les phases du stator, V;

U_{21} - la tension interphases aux anneaux du rotor, mesurée avec le rotor calé et avec le circuit du rotor ouvert;

$R_2' = (R - R_1)s$ - les moteurs asynchrones avec le rotor en court circuit;

$R = (P_{ms} - P_{m0}) / [3(I_{ms}^2 - I_{m0}^2)]$ - la résistance équivalente, théorique, d'une phase du rotor rapportée au primaire;

$s = (n_0 - n) / n_0$ - le glissement du moteur à la charge technologique;

n - la vitesse correspondante à la charge technologique (pour les calculs pratiques $n \approx n_0$).

Si la détermination des paramètres en marche à vide est difficile, alors ceux-ci peuvent être calculés avec:

$$\begin{cases} P_0 = \frac{1}{\eta_n} (a + b\beta^2) P_n \\ I_0 = P_0 / [\sqrt{3} U_{m0} \cos \varphi_0] \end{cases} \quad (5.9.)$$

où le facteur de puissance à la marche à vide est choisi entre 0,2 ... 0,4, en fonction de la puissance du moteur d'entraînement. Les résultats obtenus conformément à relation (5.7.) ne diffèrent pas plus de $\pm 3\%$ par rapport aux résultats expérimentaux.

- les pertes d'énergie dans le fer et pertes mécaniques:

$$\Delta E_{aFM} = (P_{m0} - 3R_1 I_{m0}^2) T_f \text{ [KWh]} \quad (5.10.)$$

- l'énergie utile dans le processus technologique:

$$E_{au} = E_{am} - \Delta E_{aCu} - \Delta E_{aFM} \text{ [KWh]} \quad (5.11.)$$

L'énergie réactive sollicitée par le moteur, numériquement égale à celle des bornes du tableau de distribution ($E_{ri} \equiv E_{rm}$), sera exprimée dans les deux situations données par:

$$E_{ri} = E_{am} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{ms} = P_{ms} T_f \cdot \operatorname{tg} \varphi_{ms} \text{ [KVARh]} \quad (5.12.)$$

avec:

$$\varphi_{ms} = \arccos \left[P_{ms} / (\sqrt{3} U_{ms} I_{ms}) \right]$$

À cette occasion on mentionne que le facteur de puissance moyen à la charge peut être déterminé analytiquement aussi (relation 4.21.), à l'aide de la relation:

$$\cos \varphi_{ms} = \beta / \sqrt{\beta^2 + [a + (1-a)\beta^2] \operatorname{tg}^2 \varphi_n}$$

en adoptant: $a = 0,65$ pour $\beta \leq 0,5$ et $a = 0,8$ si $\beta > 0,5$.

Le courant et le facteur moyen de puissance moyen en charge pour plusieurs récepteurs ou outillages se déterminent à l'aide de la relation:

$$\begin{cases} I_{ms\Sigma} = E_{ai\Sigma} / [\sqrt{3} U_{ms} \cdot T_f \cos \varphi_{ms\Sigma}] \\ \cos \varphi_{ms\Sigma} = E_{ai\Sigma} / \sqrt{E_{ai\Sigma}^2 + E_{ri\Sigma}^2} \end{cases} \quad (5.13.)$$

où:

$$E_{ai\Sigma} = \sum_1^n (E_{ai})_j; E_{ri\Sigma} = \sum_1^n (E_{ri})_j$$

Dans le cas des colonnes et des circuits, les pertes d'énergie sont:

$$\begin{cases} \Delta E_{ac} = 3 K_{fl} R I_{ms}^2 T_f \cdot 10^{-3} \text{ [KWh]} \\ \Delta E_{rc} = 3 K_{fl} X I_{ms}^2 T_f \cdot 10^{-3} \text{ [KVARh]} \end{cases} \quad (5.14.)$$

où:

$R = R_0 L_0$ - la résistance par phase du conducteur, [Ω];

$x = x_0 L_0$ - la réactance par phase du conducteur, [Ω];

L_0 - la longueur du circuit ou de la colonne, [Km];

R_0, x_0 - la résistance et la réactance spécifique, [Ω / Km];

On mentionne à cette occasion que dans le cas des réseaux courts, réalisées dans un câble ou dans des conducteurs, la réactance de la ligne est réduite et le terme ΔE_{rc} a des valeurs négligeables. Pour les lignes aériennes ou celles du système DISBAR il s'impose le calcul des pertes d'énergie réactive afférentes aux colonnes.

Dans le cas des transformateurs à deux enroulements les pertes d'énergie ont les expressions:

$$\begin{cases} \Delta E_{aT} = \Delta P_0 T_c + K_{fs} \beta^2 \Delta P_{sc} T_f + P_v T_v \\ \Delta E_{rT} = \Delta Q_0 T_c + K_{fs} \beta^2 \Delta Q_{sc} T_f + Q_v T_v \end{cases}; \beta = \frac{S_{ms}}{S_{nSTAS}} \quad (5.15.)$$

où:

$\Delta P_0, \Delta P_{sc}, \Delta Q_0, \Delta Q_{sc}$ - sont des pertes caractéristiques du transformateur;

P_v, Q_v - la puissance active et réactive sollicitée du réseau par le moteur d'entraînement du ventilateur, dans le cas des transformateurs à refroidissement forcé;

T_c - la durée annuelle de connexion du transformateur, [heures];

T_f - la durée annuelle de fonctionnement du transformateur à charge technologique moyenne (heures);

T_v - la durée annuelle de connexion du ventilateur de refroidissement (heures).

Le rendement conventionnel de transformation énergétique doit être déterminé à divers niveaux:

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta_{cte} = \frac{E_{au}}{\Delta E_{au} + \Delta E_a + \Delta E_{acm}} = \frac{E_{au}}{\Delta E_{acm} + E_{ai}} - \text{au niveau du} \\ \text{tableau secondaire} \\ \eta_{cte} = \frac{E_{au}}{\Delta E_{acTD} + \Delta E_{acm} + E_{ai}} - \text{au niveau du tableau general} \\ \eta_{cte} = \frac{E_{au}}{E_{aIT}} - \text{au niveau du poste de transform ation, respective ment} \\ \text{sous contour de bilan ou d'entreprise} \end{array} \right. \quad (5.16.)$$

Dans le cas des processus énérgointensifs le bilan se fait de telle manière qu'il contienne tant les éléments d'un bilan électro-énergétique, que ceux d'un bilan thermo énergétique. L'énergie électrique est le porteur de base, alors que la chaleur est utilisée soit comme auxiliaire, soit comme résultat de la transformation de l'énergie électrique. Dans les processus où l'énergie électrique est utilisée aussi aux actionnements, on va aussi élaborer séparément le bilan sur les récepteurs respectifs.

Pour chaque processus on va déterminer l'indicateur « consommation spécifique d'énergie par l'unité de produit ».

5.2.2. L'analyse des bilans électroénergétiques réels

Les bilans électro-énergétiques réels se réalisent pour des récepteurs, des outillages, des équipements, des installations, des lignes technologiques, des services, des usines et des entreprises.

Conformément aux normatifs actuels, ces bilans seront horaires (par relève, période d'activité, etc.) et annuelles.

Les bilans annuels se réalisent, de règle, par lignes technologiques, tableaux de distribution, services, etc. Les énergies annuelles résultent des énergies horaires par l'amplification de celles-ci avec la durée annuelle de fonctionnement à la charge technologique et au coefficient de demande d'énergie:

$$k_{ce} = \frac{k_i k_s}{\eta_m \eta_r} \frac{T_f}{T_{an}} = k_c \frac{T_f}{T_{ou}} \quad (5.17.)$$

Dans la structure du coefficient de demande d'énergie interviennent tant les éléments du coefficient de demande que le rapport entre le temps de fonctionnement (T_f) à la charge technologique moyenne et le temps total annuel (T_{an}) de connexion de l'équipement analysé.

On mentionne ici que les bilans horaires (les relèves, etc.) s'arrêtent au niveau des barres de base tension, du poste de transformation, et les bilans annuels comprennent aussi les pertes dans les transformateurs.

Pour la systématisation des calculs de bilan, on recommande que ceux-ci soient présentés tant sous une forme tabulaire (tableau 5.2....5.6.), que sous une forme graphique (fig. 5.2.- le diagramme de Sankey). La base de comparaison dans le cas des valeurs exprimées en pourcentages est l'énergie totale entrée dans le point auquel se réfère le bilan.

L'analyse du bilan réel annuel est faite sur la base des données suivantes:

- la quantité d'énergie, en valeur absolue, mise en évidence dans le bilan;
- le diagramme de Sankey, qui met en évidence les consommations utiles et les pertes d'énergie électrique;
- l'expérience obtenue pour des installations de même type, par ceux qui élaborent le bilan;
- les informations de la littérature de spécialité par rapport au niveau des indicateurs d'efficacité réalisés ailleurs;
- les informations de la littérature de spécialité qui se réfèrent aux brevets, aux inventions concernant les équipements (identiques ou similaires à ceux examinés ou aux équipements qui mettent mieux en valeur l'énergie dans des processus de même type);
- les informations regardant les caractéristiques techniques des matériaux qui conditionnent le déroulement du processus à un niveau supérieur;

- les informations par rapport à l'appareil de contrôle, de mesurage, de réglage et d'automatisation qui permettent une meilleure maîtrise du processus.

De cette analyse il résulte les directions dans lesquelles on doit actionner et les mesures concrètes qui doivent être prises. Pour chacune de ces mesures on calcule l'efficacité économique (exprimée en tonnes combustible conventionnel (tcc)/année et euro/année - à la valeur du combustible marginal en vigueur à la date de l'élaboration du bilan) et la durée estimative de récupération des investissements (DR) sur le compte de la valeur des économies réalisées.

$$DR = \frac{A}{B - C} \text{ [ans]} \quad (5.18.)$$

où:

A - représente le coût, en lei, de l'investissement de l'ouvrage;

B - la valeur annuelle de l'énergie économisée (au prix courant du combustible marginal), [euro/année];

C - les dépenses annuelles d'exploitation et d'entretien résultées comme conséquence de la réalisation du travail, [euro/année].

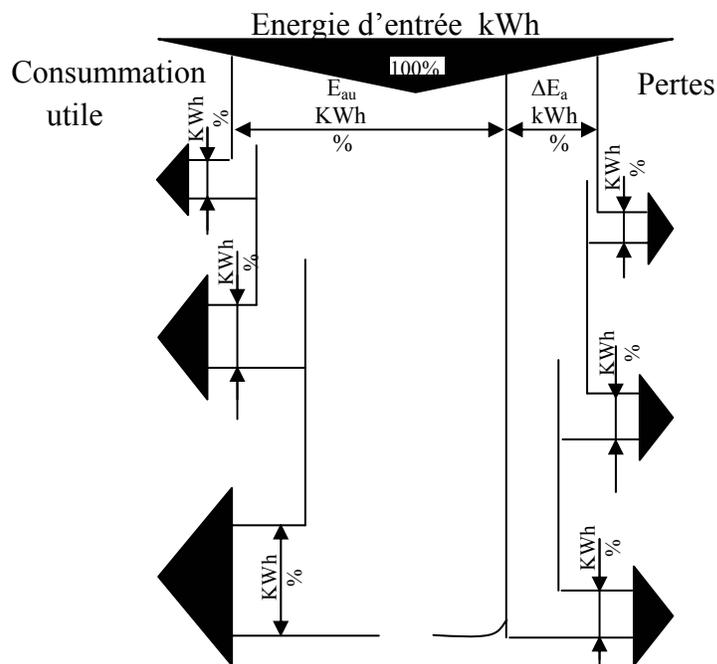


Fig. 5.2. Le diagramme de Sankey,

L'effet énergétique des mesures prises à la suite de l'analyse du bilan réel influence directement les composantes utiles de sortie (*tableau 5.6.*) du b.e.e. réel annuel conduisant au bilan optimisé.

Le bilan électroénergétique optimisé est calculé comme le bilan réel et il comprend les valeurs diminuées, correspondantes des mesures proposées pour économiser l'énergie électrique. Le bilan électroénergétique optimisé pour les processus énérgo-intensifs s'élabore de manière similaire, mais tenant compte de l'existence, dans le contour, de plusieurs formes d'énergie.

Après l'établissement des mesures avec applicabilité au cas concret étudié, on va calculer l'indicateur d'efficacité énergétique dans la situation proposée. À la fin on élabore une annexe (*tableau 5.1*) qui va contenir des propositions d'un programme de mesures, les termes estimés par l'auteur de bilan pour la phase de projet et d'exécution de l'installation préconisée, l'économie présumée (tcc/année; euro/année) à la valeur courante du combustible marginal, le coût de l'investissement respectif, le coût des travaux annuels d'entretien et de réparation occasionnelle et la durée de récupération de l'investissement pour les économies d'énergie calculées antérieurement.

Tableau 5.1.

Proposition d'un programme de mesures pour l'augmentation de l'efficacité énergétique.

No. courant	Mesure proposée	Terme proposé	Économies antérieures calculées		Dépenses annuelles d'entretien et d'exploitation	Coût d'investissements [milles euro]	Durée de récupération [mois]
			[Tcc/an]	[euro/an]			
1							
2							

Il faut préciser que les termes indiqués par celui qui élabore le bilan ont le rôle d'attirer l'attention sur l'importance de la ressource, les termes réels étant établis par la commission d'approbation du bénéficiaire du bilan.

En ce qui concerne certains moyens et méthodes pour économiser l'énergie électrique, on mentionne:

- la charge des équipements aux valeurs de charge les plus proches des valeurs nominales;
- le fonctionnement des moteurs électriques, qui démarrent en étoile-triangle, dans la connexion en étoile, si la valeur de couple de la charge est de $0,44 \cdot M_n$ tout au plus:

- l'utilisation des limiteurs de marche à vide, si la durée de pause dépasse 15...20s;
- l'exécution des réparations de qualité et la vérification par stand, des paramètres de l'équipement;
- la circulation de l'énergie dans les réseaux du consommateur à un facteur de puissance proche du neutre, ce qui suppose une compensation individuelle ou de groupe;
- le fonctionnement des transformateurs selon le graphique de pertes minimales.
- le remplacement des moteurs surdimensionnés par d'autres à puissance inférieure;
- la division par secteurs des installations d'éclairage intérieur;
- l'utilisation des installations de télégestion de l'énergie électrique (RGCOPÉC), pour mettre en évidence les points avec une consommation énergétique exagérée;
- l'amélioration de l'isolation thermique pour les fours électriques (si possible), etc.

Finalement, on mentionne qu'en conformité avec la législation actuelle, la structure d'un travail de bilan doit être la suivante:

- la présentation de la méthodologie de calcul;
- les caractéristiques techniques des principaux outils et installations contenues dans le contour;
- le schéma du flux technologique;
- la présentation sommaire du processus technologique (des paramètres techniques et économiques, marginaux);
- l'établissement de l'unité de référence associée au bilan (heure, cycle, an, charge, tonne, etc.);
- les appareils de mesure utilisés, avec l'indication des classes de précision;
- les schémas électriques monofilaires des points de mesure;
- les schémas des fiches de mesurage;
- l'équation de bilan;
- le calcul des composantes du bilan (expressions analytiques, formules de calcul);
- les tableaux et les diagrammes de bilan;
- l'analyse du bilan (la comparaison des composantes utiles et des composantes de pertes avec les composantes des processus et des installations similaires, avec celles des bilans de projet, de réception, d'homologation ou optimisées connues sur plan interne et dans la littérature de spécialité);
- le bilan optimisé;
- le programme de mesures et d'actions pour la réduction des consommations énergétiques;

- le calcul d'efficacité économique des principales mesures établies.

Tableau 5.2.

Le bilan électro-énergétique réel par heure et par l'outillage.

No crt.	Dénomination de l'outillage actionné	Des moteurs d'actionnement	Caractéristiques du moteur d'actionnement									
			Donnés nominales					Donnés expérimentales et de calcul				
			Pn [kw]	In [A]	cos φ _n η _n	η _n [t/min]	Pms [kw]	Ims [A]	β	Cos φ _{ms} η _s	E _{am} [kwh]	ΔE _a [kwh]

Tableau 5.3.

Le bilan électro-énergétique réel par heure de l'outillage alimenté de

No. crt.	Dénominatin de l'outillage	No.b.	I _{max} [A]	Type de câble	L _C [m] R _C [Ω]	E _{ai} [kwh]	ΔE _{nom} [kwh]	ΔE _{am} [kwh]	ΔE _a [kwh]	E _{am} [kvarh]	E _{ri} [kVar]	η _{cte}	TD
----------	----------------------------	-------	----------------------	---------------	--	-----------------------	-------------------------	------------------------	-----------------------	-------------------------	------------------------	------------------	----

Tableau 5. 4.

Le bilan électro-énergétique réel annuel des outillages alimentés de

No. crt.	Point de mesure, Secteur d'activité	T _f [h]	E [*] _{ai} [kwh]	ΔE _a [kwh]	E _{ai} [kwh]	ΔE _a [kwh]	E _{au}	E _{ri} [kVAr]	Cosφ _{ms}	η _{cte}	k _{ce}	Rém.
----------	-------------------------------------	--------------------	------------------------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------	------------------------	--------------------	------------------	-----------------	------

$$E_{ai}^* = \Delta E_{ac} + E_{ai}; \Delta E_{ac} = \Delta E_{acTD} + \Delta E_{acm}$$

Tableau 5.5.

Le bilan électro-énergétique réel annuel des réseaux d'alimentation (colonnes).

No. crt.	Départ/Arrivée	Type conditions d'alimentation	L_c [m] R_c [Ω]	$\cos \varphi_{ms}$	T_f [h]	I_{ms} [A]	ΔE_{acTD} [kWh]	k_{ce}
----------	----------------	--------------------------------	---------------------------------	---------------------	--------------	-----------------	----------------------------	----------

Tableau 5.6.

Le bilan électro-énergétique réel annuel des outillages alimentés (tableau de distribution, service, ligne technologique, poste de transformation, etc.).

Entrés	kwh	%	Sorties	kwh	%	kwh	%	kwh	%
Énergie électrique absorbée [E_{ait}]			Consommation utile	X	X				
			Consommation totale	X	X			X	X
			Pertes dans les conducteurs d'alimentation: - récepteurs - tableaux de distribution	X X	X X				
			Pertes totales dans les conducteurs					X	X
			Pertes dans les récepteurs	X X	X X				
			Pertes totales dans les récepteurs						
			Pertes dans les transformateurs						
			Pertes totales						
Total de l'énergie entrée	X	X	Énergie totale sortie					X	X