

где  $I$  и  $I_0$  – энталпия свежего и отработанного воздуха, кДж/кг, для расчета приняты  $I = 46,47$  кДж/кг,  $I_0 = 86,37$  кДж/кг [3];

$t_1$  и  $t_2$  – начальная и конечная температура солода, °С, для расчета приняты  $t_1 = 17$  °С,  $t_2 = 80$  °С;

$G_c$  – масса свежевысушенного солода, кг;

$C_c$  и  $C_e$  – удельная теплоемкость высушенного солода и воды, кДж/(кг·°С), для расчета принимаем  $C_c = 1,42$  кДж/(кг · °С);  $C_e = 4,1868$  кДж/(кг·°С) [3];

$\eta$  – КПД сушилки, учитывающий потери тепла в окружающую среду, для расчета примем равным 0,8.

Результаты расчета сведены в табл. 1. Из таблицы видно, что количество испаряемой влаги из солода, зерно которого предварительно обрабатывали неоднородным электрическим полем, меньше на 2,9 %, а количество энергии на сушку такого солода меньше на 0,03 Гкал в пересчете на 1 т исходного зерна влажностью 14 % по сравнению с солодом, зерно которого не подвергалось обработке.

*Таблица 1 – Результаты расчета потребности в тепловой энергии на сушку светлого солода в расчете на 1 т исходного зерна влажностью 14 %*

№ образца	Масса свежепроросшего солода, кг	Количество испаряемой влаги, кг	Расход воздуха в сушилке, кг	Расход тепловой энергии на сушку солода, Гкал
Контроль	1322	427,6	35633	0,439
Зерно подвергнутое электрической обработке	1293	398,6	33217	0,409
Разница ±	- 29	- 29	- 2416	- 0,03

### Заключение

По результатам исследований видно, что расход энергии на сушку светлого солода при обработке пивоваренного ячменя неоднородным электрическим полем меньше на 0,03 Гкал, что составляет 4,286 кг у.т. в пересчете на 1 т исходного зерна влажностью 14% по сравнению с солодом, зерно которого не подвергалось обработке.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Продукт by [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://produkt.by/news/kachestvo-pivovarennogo-yachmenya-v-etom-godu-vysshe-proshlogodnego> – Дата доступа: 14.08.2018.
2. Способ обработки пивоваренного ячменя в сухом виде : пат. 22032 Респ. Беларусь, МПК C12C 1/02 О. В. Бондарчук, В. А. Пашинский, Н. Ф. Бондарь; заявитель Учреждение образования «Белорусский аграрный технический университет». – № а 20160040; заявл. 10.02.2016; опубл. 30.10.2017 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтелектуал. Уласнасці / – 2017. – №5. – С. 21.
3. Киселева Т. Ф. Технология отрасли. Технологические расчеты по производству солода: учебное пособие / Т. Ф. Киселева; Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. – Кемерово, 2005. – 120 с.

## МИНИМИЗАЦИЯ ПОТЕРЬ В СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ ПУТЕМ ОПТИМИЗАЦИИ ИХ ЗАГРУЗКИ

### MINIMIZATION OF LOSSES IN POWER TRANSFORMERS BY OPTIMIZATION OF THEIR LOAD

**В. А. Пашинский, П. С. Величко**  
**V. A. Pashynski, P. S. Velichko**

*Белорусский государственный университет, МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ,  
г. Минск, Республика Беларусь, pashynski@mail.ru  
Belarusian State University, ISEI BSU, Minsk, the Republic of Belarus*

Приведена методика определения расчетной мощности трансформатора трансформаторной подстанции методом эффективного числа электроприемников с целью минимизации потерь в стали и меди трансформатора путем повышения коэффициента загрузки до оптимального значения не менее 0,75.

The method of determination of calculation power of transformer of transformer substation is resulted by the method of effective number of electro-receivers with the purpose of minimization of losses in steel and copper of transformer by the increase of load factor to the optimum value no less than 0,75.

*Ключевые слова:* трансформатор, электрическая нагрузка, эффективное число электроприемников, потери энергии.

*Keyword:* transformer, electric loading, effective number of electro-receivers, losses of energy.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2021-2-308-311>

Современное состояние использования трансформаторных мощностей свидетельствует о том, что их загрузка составляет в среднем не более 35 %. Это приводит к значительным потерям в трансформаторах. Для повышения эффективности электропотребления необходимо снижение непроизводительных потерь электроэнергии в элементах систем электроснабжения. Одним из путей решения этой проблемы является создание оптимального режима работы трансформаторных подстанций при условии обеспечения надежного питания узла нагрузки.

Необходимо учитывать то, что в общей структуре затрат электроэнергии на её транспортирование и распределение часть потерь электроэнергии в трансформаторах превышает 20% [1].

В настоящие времена в промышленно развитых странах осваивают выпуск высокоэффективных трансформаторов со сниженными потерями холостого хода (х.х.) и нагрузочными потерями. В Европе замена трансформаторов на современные обеспечивает экономию затрат на транспорт электроэнергии, равную 2 миллиардам евро. В результате реализации мероприятий в европейском строительстве потери х.х. для условного трансформатора (напряжением 220 кВ мощностью 200 МВ·А) за последние 50 лет снижены более чем втрое, а нагрузочные потери вдвое.

Потери х.х. приносят убытки в несколько раз больше, чем нагрузочные потери, составляя основную часть капитальных затрат. Убытки от потерь х.х. особенно существенны для трансформаторов малых мощностей (до 1000 кВ·А).

Снижение потерь х.х. трансформаторов достигается за счет:

- повышения качества электротехнической стали за счет увеличения магнитной проницаемости;
- применения аморфных сталей, потери в которых ниже в 3 – 4 раза, чем у обычных сталей;
- использования электротехнической стали толщиной до 0,18 мм;
- проектирования сердечника трансформатора с низким уровнем индуктивности.

Учитывая сложившуюся в современных условиях стабильную неравномерность суточных графиков электрических нагрузок, требующую изменения схемы питания узла нагрузки, рассмотрим возможные варианты переключений в зависимости от загрузки трансформаторов с целью экономии электроэнергии и определим функциональную зависимость потерь активной мощности трансформаторов при изменении электрической нагрузки и правильном ее определении.

Как известно, потери в трансформаторах в симметричном номинальном режиме складываются из потерь в стали и меди [2]:

$$\Delta P_i = \Delta P_{xxi} + \Delta P_{kzi} K_3, \quad (1)$$

где  $\Delta P_{xxi}$ ,  $\Delta P_{kzi}$  – потери х.х. и короткого замыкания (к.з.)  $i$ -го трансформатора, которые принимаются по справочным данным трансформаторов завода изготовителя;  $K_3$  – коэффициент загрузки  $i$ -го трансформатора, который рекомендуется не менее 0,75.

Потери в работе трансформатора мощностью  $S_1$  можно определить, как потери при его фактической нагрузке  $S_{11}$  [2]:

$$\Delta P_1 = \Delta P_{xx1} + \frac{S_{11}}{S_1} \Delta P_{kz1}. \quad (2)$$

Зависимость удельных приведенных потерь мощности  $[\Delta P]_{T^{\wedge}''}/S_{\text{ном.т}}$  от коэффициента загрузки трансформаторов представлены на рис. 1. Из рисунка видно, что интенсивный рост удельных потерь в трансформаторах серии ТМ мощностью от 630 до 1600 кВ·А наблюдается при низких коэффициентах загрузки, а загрузка трансформаторов ниже 0,7 не экономична.

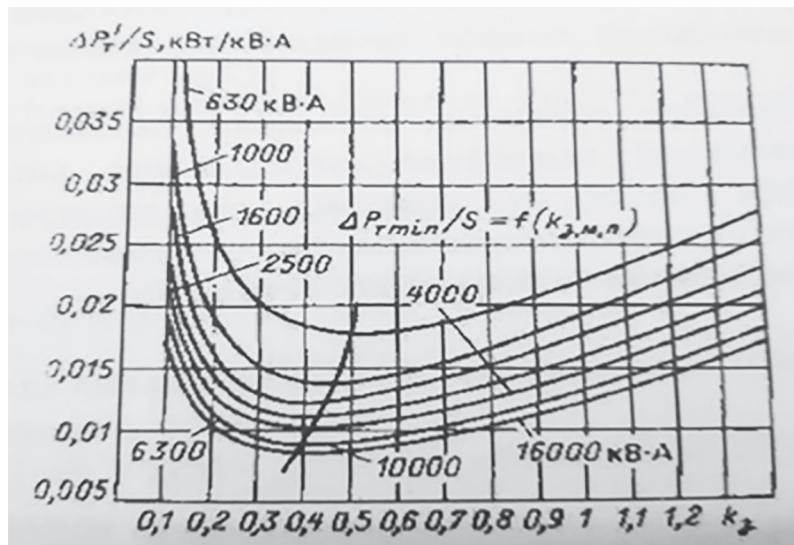


Рис. 1 – Зависимость удельных приведенных потерь мощности трансформаторов серии ТМ от коэффициента загрузки  $k_3$

Поэтому задача оптимальной загрузки трансформаторов является актуальной и соответствует максимальному значению КПД трансформатора:

$$\eta_T = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P''_T}{P_2 + \Delta P''_T}, \quad (3)$$

где  $P_2$  – активная мощность, поступающая из сети;

$P_1$  – активная мощность, отдаваемая трансформатором во вторичную сеть;

$\Delta P''_T$  – приведенные потери активной мощности в трансформаторе.

Передача реактивной мощности вызывает потери активной мощности и энергии в элементах сети. Поэтому снижение транспортировки реактивной мощности позволит снизить потери активной мощности. Если в узле энергосистемы реактивная мощность уменьшается на  $\Delta Q$ , то потери активной мощности от узла до источника энергии определяются выражением:

$$\Delta P'' = (Q_p - \Delta Q)^2 R / U_n^2, \quad (4)$$

где  $U_n^2$  – номинальное напряжение в узле энергосистемы;

$R$  – активное сопротивление цепи от узла до источника энергии. Компенсацию реактивной мощности возможно производить с помощью компенсирующих устройств. Однако установка компенсирующих устройств целесообразна, когда эффект снижения потерь активной мощности и энергии при компенсации реактивной мощности будет больше приведенных затрат, связанных с проектированием, капитальными вложениями и эксплуатацией компенсирующего устройства. При этом простой срок окупаемости капиталовложений не превысит пять лет.

Учитывая сложившуюся в современных условиях стабильную неравномерность суточных графиков электрических нагрузок, требующую изменения схемы питания узла нагрузки, рассмотрим возможные методики определения расчетных нагрузок.

Методы расчета электрических нагрузок, применяемые при проектировании систем электроснабжения, подразделяют на две группы: основные и вспомогательные.

К основной группе относятся методы расчета по:

- установленной мощности и коэффициенту спроса; средней мощности и коэффициенту формы графика нагрузок;

- средней мощности и отклонению расчетной нагрузки от средней (статический метод);

- методом эффективного числа электроприемников (метод упорядоченных диаграмм).

К вспомогательным методам относят расчеты по:

- удельному расходу электроэнергии на единицу продукции при заданном объеме выпуска продукции за определенный период времени;

- удельной нагрузке на единицу производственной площади.

Метод расчета электрических нагрузок выбирается следующим образом:

- 1) при определении расчетных нагрузок по отдельным группам приемников и узлам напряжением до 1000 В цеховых сетей следует использовать метод эффективного числа электроприемников (упорядоченных диаграмм) или статический метод;

- 2) при определении расчетных нагрузок на высших ступенях системы электроснабжения, начиная с цеховых шинопроводов или шин цеховых трансформаторных подстанций и кончая линиями, питающими предприятия, рекомендуется применять методы расчета, основанные на использовании средней мощности и коэффициентов мощности  $\cos \varphi$ , формы  $K_f$  и отклонения;

- 3) при ориентировочных расчетах на высших ступенях системы электроснабжения можно применять метод расчета по установленной мощности и коэффициенту спроса  $K_c$ , а в некоторых случаях по удельным показаниям потребления электроэнергии.

Все вышеперечисленные методы расчета электрических нагрузок применяются при проектировании системы электроснабжения промышленных предприятий. Они могут случайно применяться и при проектировании электрических сетей сельскохозяйственного назначения, если предприятия, которые питаются от этих сетей, по составу оборудования и режиму работы аналогичны промышленным. Наиболее точным методом расчета электрических нагрузок является метод эффективного числа электроприемников.

Эффективным числом электроприемников называется такое число однородных по режиму работы электроприемников одинаковой мощности, которое обуславливает то же значение расчетной нагрузки, что и группа различных по мощности реальных электроприемников.

Эффективное число электроприемников определяют по формуле [5]:

$$n_s = \frac{(\sum P_{rh})^2}{\sum n \cdot p_{rh}^2}, \quad (5)$$

где  $P_{rh}$  – групповая установленная (номинальная) мощность ЭП, кВт;  $p_{rh}$  – установленная (номинальная) мощность одного ЭП, кВт;  $n$  – число ЭП.

Формулой (3) можно пользоваться для любого числа электроприемников.

Определение значений расчетных нагрузок ( $P_p, Q_p, S_p, I_p$ ), проектируемого объекта в основном сводится к нахождению числа  $n_s$ .

По известной величине  $n_s$  с использованием таблицы в зависимости от  $K_p = f(n_s, K_i)$  находят величину коэффициента расчетной нагрузки  $K_p$ . Далее, применяя известные формулы, определят искомые величины.

$$P_p = K_p \sum_{i=1}^n k_i p_n; \quad (6)$$

$$Q_p = 1,1 \sum k_u p_n t g \varphi \text{ (для } n < 10\text{);} \quad (7)$$

$$Q_p = \sum k_u p_n t g \varphi \text{ (для } n > 10\text{);} \quad (8)$$

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2}; \quad (9)$$

$$I_p = S / \sqrt{3} \cdot U_H. \quad (10)$$

Для значительного числа электроприемников (несколько десятков), когда расчеты получатся громоздкими, а потому затруднительными, применяют упрощенную формулу для расчета числа  $n_s$  (вместо формулы 3):

$$n_s = \frac{2 \sum P_h}{P_{\max}}, \quad (11)$$

где  $P_{\max}$  – наибольшая мощность электроприемника группы.

В результате расчета по упрощенной формуле (11) может оказаться  $n_s$  больше  $n$ , тогда следует принимать  $n_s = n$ . Для случая, когда для электроприемников электроустановки отношение  $P_{\max} / P_{\min} \leq 3$ , то также принимают  $n_s = n$ . Здесь  $P_{\max}$ ,  $P_{\min}$  – номинальные мощности соответственно наиболее мощного и наименьшего по мощности электроприемников рассчитываемой группы ЭП.

При решении данной задачи упрощенную формулу при необходимости целесообразно применить только при расчете нагрузок по зданию в целом.

### Заключение

1. Минимизировать потери активной мощности в цеховых трансформаторах возможно путем оптимизации трансформаторных мощностей в нормальном и послеаварийном режимах.

2. Снижение потерь активной мощности в силовых трансформаторах обеспечивается улучшением качества электроэнергии, а также обновлением трансформаторного парка, выполненного по высокоэффективным технологиям.

3. Снижения потерь х.х. достигается за счет:

- повышения качества электротехнической стали с повышенной магнитной проницаемостью со сниженными удельными потерями на перемагничивание и вихревые токи;
- проектирования сердечника трансформатора для работы с низким уровнем индуктивности;
- применения аморфных сталей, потери в которых в 3–4 раза меньше чем в обычных сталях;
- использования листовой стали со сниженной толщиной листа (до 0,18 мм).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Энергосберегающее оборудование. Восточноевропейский журнал передовых технологий, № 6, 2012. – с. 12.
2. Дерзский В. Г. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в распределительных сетях. / В. Г. Дерзский, В. Ф. Скиба // Энергосбережение · Энергетика · Энергоаудит, № 6, 2009. – с. 20 – 21.
3. Проектирование электроустановок. Практикум: учебно-методическое пособие/ П. В. Кардашов, Н. И. Павловиков, О. В. Бондарчук. – Минск : БГАТУ, 2019. – 144 с.
4. Кирисов И.Г. Минимизация потерь в силовых трансформаторах при изменении режима нагрузки. / И. Г. Кирисов, Т. И. Овчаренко // Энергосбережение · Энергетика · Энергоаудит, № 6, 2014. – с. 49 – 56.

## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОДГОТОВКИ СЕМЯН САЛАТОВ К ПОСЕВУ

### ENERGY EFFICIENT TECHNOLOGIES OF PREPARATION OF SALAD SEEDS FOR SOWING

**B. A. Пашинский, B. B. Сивуха**

**V. Pashynski, V. Sivukha**

Белорусский государственный университет, МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ,  
г. Минск, Республика Беларусь, [pashynski@mail.ru](mailto:pashynski@mail.ru)  
Belarusian State University, ISEI BSU, Minsk, the Republic of Belarus

Приведена обзорная информация о возможности подготовки семян к посеву, с целью повышения всхожести и урожайности, путем воздействия на их переменного неоднородного электрического поля высокой напряженности.