**УДК 629.162.214**

**МРНТИ 44.01.99**

**К.Б. Дымков1\*,****Е.В. Иванова2**

*Инновационный Евразийский Университет (г. Павлодар)*

*\*(е-mail:* [*dimkov\_konstantin70@mail.ru*](mailto:dimkov_konstantin70@mail.ru)*)*

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЗА СЧЕТ МОДЕРНИЗАЦИИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

**Аннотация**

*Основная проблема:* Доклад посвящен исследованию и анализу эффективности системы электроснабжения и электропотребления на предприятии по добыче и переработке полезных ископаемых. В работе рассматриваются параметры и характеристики различных типов трансформаторов, дана сравнительная оценка их энергетических КПД, и намечены пути повышения энергоэффективности.

*Ключевые слова:* энергоэффективность, процесс электропотребления, процесс электроснабжения, энерготехнологические характеристики, модернизация.

**Введение**

Добыча многих полезных ископаемых производилась низко рентабельным шахтным способом, требующим выполнения большого объёма горнокапитальных и горноподготовительных работ, использования широкого арсенала горно-шахтного оборудования, буровзрывной техники и специальных инструментов [2].

В рамках реализации программы по индустриально-инновационному развитию разрабатывается технология переработки рудных и техногенных материалов, содержащих редкие и рассеянные элементы и пр. полезные компоненты. Вместе с вовлечением в работу свободных производственных площадей и оборудования планируется переработка новых видов сырья с получением новых видов готовой продукции.

Комплекс гидрометаллургического оборудования и процессов, позволяет осуществлять автоклавное выщелачивание любых минеральных ресурсов, отработано сорбционное извлечение практически всех металлов системы Менделеева, безупречно работает система газоулавливания и хранения техногенных отходов [3].

**Обсуждение**

Но даже с учетом всех новшеств и реконструкций, силовые трансформаторы не удалось загрузить даже на половину от номинальной мощности. Вследствие чего, предприятие несет большие потери электроэнергии.

Системы электроснабжение многих предприятий, были спроектированы и введены в эксплуатацию в прошлом веке. В результате конверсии, потери государственного и оборонного заказа, объемы производства снизились до минимума, что привело к снижению потребления электроэнергии [4].

Электроснабжение электроприемников промышленных предприятий напряжением до 1 кВ, осуществляется через одно и двух трансформаторные подстанции 6-10/0,4 кВ. Основным принципам построения рациональной схемы электроснабжения в наибольшей степени удовлетворяет система двух трансформаторных подстанций с двумя питающими линиями с применением секционирования на вторичном напряжении. При этом на вторичной стороне может быть предусмотрена параллельная или раздельная работа силовых трансформаторов. Параллельная работа по экономическим соображениям является предпочтительной. Однако в большинстве случаев в основном из-за необходимости ограничения токов короткого замыкания трансформаторы работают раздельно на определенную часть общей нагрузки. При использовании одно трансформаторных подстанций резервирование электроснабжения осуществляется с помощью перемычек между соседними подстанциями, выполненными кабелями или шинопроводами.

При исследовании систем энергоснабжения было выявлено что некоторые силовые трансформаторы имеют коэффициент загруженности ниже 40%, что не целесообразно с экономической точки зрения.

Важным мероприятием по снижению потерь мощности и электроэнергии, а также по повышению коэффициента мощности являются своевременное отключение, вывод в резерв трансформаторов при снижении их нагрузок на достаточно длительный период и включение трансформаторов при росте нагрузок. Такие изменения нагрузок могут быть обусловлены производственными причинами (уменьшение поставок сырья, трудностями реализации продукции, изменением технологии производства, реконструкцией производственных установок и т. п.), сезонным характером электрических нагрузок и др.

Естественно, вывод в резерв трансформатора должен осуществляться после перевода его нагрузки на другие работающие трансформаторы. Для ответственных электроприемников должны быть предусмотрены устройства автоматического включения резерва (АВР) на напряжении до 1 кВ. Преднамеренные отключения трансформаторов с целью экономии энергоресурсов не должны отрицательно сказываться на надежности электроснабжения потребителей электроэнергии. Для определения целесообразности отключения одного из трансформаторов, работающих на общую нагрузку, необходимо использовать критерий оптимальности. Такими критериями могут быть минимум потерь мощности или электроэнергии за рассматриваемый период.

Но не только коэффициент загрузки влияет на снижение потерь в трансформаторах, все больше фактов, подтверждающих, что с ростом срока службы силовых трансформаторов объективно увеличиваются потери холостого хода в результате старения магнитной системы, изменения структуры металла, ухудшения межлистовой изоляции, ослабления прессовки сердечника трансформатора. При вводе трансформаторов в эксплуатацию и после капитального ремонта этот показатель не должен отличаться от указанного в протоколе заводских испытаний (паспорте) более чем на 5%. Однако на практике потери холостого хода эксплуатируемых силовых трансформаторов значительно превышают паспортные. По мнению заводов-изготовителей, за срок 20-40 лет они могут увеличиться более чем на 5-10% от их паспортной величины.

В промышленно развитых странах, эту важную проблему, активно пытаются решить, заменой старых силовых трансформаторов, на новые, еще не выработавших свой ресурс, силовые трансформаторы с уменьшенными потерями холостого хода и короткого замыкания.

В США, где в настоящее время общие потери в силовых трансформаторах составляют около 2% производимой в стране электроэнергии (около 60 млрд. кВтч) проводится программа «EnergyStar» по внедрению высоко­эффективных трансформаторов с пониженным уровнем потерь хо­лостого хода и нагрузочных потерь. Снижение потерь в трансформаторах на 10 %дает ежегодную экономию 300 - 500 млн дол. В Европе замена трансформаторов на современные, наиболее эконо­мичные модели, может дать ежегодно экономию электроэнергии около 20 ТВт ·ч, что составило бы около 2 млрд. евро. Действенным средством стимулирования экономии электро­энергии является премия за использование трансформаторов с ма­лыми потерями [5].

Потери, в сетях энергокомпании «NationalGridна», 20 % определяют­ся потерями в трансформаторах. На нагрев сетевых и блочных транс­форматоров уходит около 1,6 % производимой электроэнергии.

Приведем для примера общие потери в крупных блочных и сете­вых трансформаторах на разные напряжения (по данным компании Renzmann&Gruenewald GmbH, ФРГ) (табл.1).

В результате принятых в европейском трансформаторостроении мер на базе совершенствования конструкции и материалов потери холостого хода для условного трансформатора 220 кВ мощностью 200 МВА снизились за последние 50 лет более чем втрое, а нагру­зочные потери – вдвое.

Таблица 1. Общие потери в крупных трансформаторах

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Блочные трансформаторы | | | Сетевые трансформаторы | | |
| Мощность,  МВА | Напряжения,  кВ | Потери,  кВт | Мощность,  МВА | Напряжения,  кВ | Потери,  кВт |
| 850 | 415/27 | 1880 | 600 | 400/230 | 1775 |
| 850 | 420/21 | 2255 | 300 | 400/120 | 920 |
| 500 | 420/21 | 1600 | 500 | 245/21 | 1430 |
| 200 | 420/21 | 1080 | 200 | 245/21 | 845 |
| 150 | 400/33 | 640 | 300 | 230/120 | 1025 |
| - | - | - | 150 | 220/110 | 530 |

Потери холостого хода приносят ущерб, в несколько раз больший, чем нагрузочные потери, составляя основную часть капитализированных потерь. Ущерб потерь холостого хода особенно значителен для трансформаторов меньшей мощности. Так, если для современного трансформатора 500 кВ мощностью 1000 МВА потери составляют около 0,035 % полной мощности, то для трансформатора 11 кВ мощностью 1 МВА это уже 0,35 %. Основной ущерб энергетике по потерям приносят распределительные трансформаторы. На их совер­шенствование, снижение потерь холостого хода направлены значительные усилия зарубежных фирм. Для трансформаторов бо­льшой мощности выделение тепла потерь создает большие пробле­мы из-за высокой степени использования активных материалов и стремления к уменьшению габаритов. Выделение тепла усложняет систему охлаждения и во многом определяет конст­рукцию трансформатора.

Главной причиной потерь холостого хода являются потери в ста­ли от перемагничивания, потери от вихревых токов в пластинах ста­ли, от потоков рассеяния в других деталях транс­форматора. Нагрузочные потери включают потери в меди обмоток, потери от вихревых токов, возникающих в массивных деталях трансформатора, лежащих рядом с токоведущими частями, потери от потоков рассеяния.

Снижение потерь холостого хода может быть достигнуто за счет:

* использования для сердечника материала с существенно сни­женными потерями на перемагничивание и вихревые токи;
* оптимизации конструкции сердечника и технологии его изго­товления;
* проектирования сердечника трансформатора для работы с низ­ким уровнем индукции.

Качество электротехнической стали совершенствуется непре­рывно. Для широко применяемых сортов холоднокатаной, ориенти­рованной, с высокой магнитной проницаемостью стали с высоким содержанием кремния за рубежом 10-15 лет назад достигнут уро­вень удельных потерь около 1,05-1,10 Вт/кг при 50 Гц и 1,7 Тл. Лучшие сорта стали имеют удельные потери около 0,85 Вт/кг. Снижает потери также использование листов меньшей толщины. Так, сталь толщиной 0,23 мм, которую все чаще применяют за рубежом, имеет удельные потери на 20% меньше, чем сталь толщиной 0,3 мм [6].

Эффективной технологией обработки стали является лазерное скрайбирование с уменьшением длины ориентированных кристаллов. Таким путем в сочетании с использованием пластин уменьшен­ной толщины получен уровень удельных потерь 0,5 Вт/кг. Со сни­жением толщины листов до 0,18мм прогнозируется снижение удельных потерь до 0,3 Вт/кг [6].

Нагрузочные потериопределяются протекающими по обмоткам токами и включают потери на активном сопротивлении проводни­ков обмоток, потери на вихревые токи в проводниках, потери на вихревые токи в массивных частях трансформатора, лежащих вбли­зи токоведущих частей.

В зарубежной практике медь почти совсем вытеснила алюминий благодаря малому сопротивлению и высокой прочности - это сни­жает потери и повышает надежность трансформатора.

Так как потери на вихревые токи в проводнике пропорциональны квадрату его сечения, снижение его сечения на 33% снижает по­тери более чем на 50%. Это успешно используется для снижения на­грузочных потерь в трансформаторе. Уменьшение сечения проводников достигается применением ленточных кабелей, которые свиваются из нескольких тонких проводников. Улучшение за­полнения окна магнитопровода при использовании ленточного ка­беля для разработанной в США серии трансформаторов 141 - 500 кВ мощностью 25 - 250 MBА позволило снизить массу на 6-15%*,*потери холостого хода на 8-15%, нагрузочные потери на 3-22%. Обмотка выполнена из ленточного кабеля, представля­ющего собой пучок изолированных друг от друга лент из фольги.

Снижение потерь на вихревые токи дает использование провода с непрерывной транспозицией. Для повышения их механической прочности применяются эпоксидное покрытие элементарных про­водников в стержне и запечка стержня во время сушки обмотки.

В обмотках НН пытаются применить транспонированный провод без дополнительной изоляции для лучшего охлаждения [6].

Стремление к снижению потерь заставляет совершенствовать ме­тоды их расчета и оптимизации конструкции трансформатора. Рас­чет потерь является сложной задачей из-за необходимости опреде­ления полей в активных и пассивных узлах сложной конфигурации и вызываемых ими вихревых токов.

Преимущества ВТСП-трансформаторов: снижение нагрузочных потерь на 90%, уменьшение массы до 40%*,*ограничение токов КЗ, снижение реактивных сопротивлений, перегрузочная способность - 100% длительно, низкий уровень шума. При освоенном произ­водстве такой трансформатор на     20% дешевле обычного той же мощности [8].

По расчетам, ВТСП-трансформатор мощностью 30 MB•А будет иметь массу 20 т и не будет иметь масла, тогда как обычный имеет массу 45 т, в том числе 23 т масла [9].

Очень важно отсутствие маслохозяйства со всеми вытекающими положительными экологическими последствиями. Снижение размеров и экологические преимущества (нет масла, пожаробезопасность) расширяет возможность выбора более опти­мальных мест для подстанций в зонах с ограничениями по окружаю­щей среде, например в крупных зданиях.

Применение в будущем сверхпроводниковых трансформаторов даст новые возможности для развития энергосистем, снижения сто­имости оборудования, повышения эффективности передачи элект­роэнергии.

Капитализированные потери***.***Основой для расчета рентабельно­сти трансформатора, а также замены старого трансформатора на новый с уменьшенными потерями стала оценка стоимости электроэнергии, рас­ходуемой на потери в трансформаторе за весь срок службы (капитализированные потери). Это понятие, введенное за рубежом в последние 10-15 лет, позволяет оценить экономичность транс­форматора. Приближенно считают трансформатор неэкономич­ным, если капитализированные потери превышают его стоимость.

Трудность расчета стоимости капитализированных потерь за весь срок службы трансформатора определяется изменением во вре­мени цен на электроэнергию и на сами трансформаторы.

**Выводы**

1. Одним из важных мероприятий, не требующих дополнительных капиталовложений и инвестиций, по снижению потерь мощности и электроэнергии, а также по повышению коэффициента мощности, может стать своевременное отключение, вывод в резерв трансформаторов при снижении их нагрузок на достаточно длительный период и включение трансформаторов при росте нагрузок.

2. При расчете нормативов потерь электроэнергии в электрических сетях и в оборудовании открытых распредустройств необходимо учитывать влияние срока службы силовых трансформаторов на потери электроэнергии холостого хода.

3. С ростом стоимости потерь электроэнергии в электрических сетях становится все более актуальной замена старых силовых трансформаторов с повышенными потерями (холостого хода и нагрузочными) новыми, технически более совершенными с уменьшенными потерями. Очевидно, что такая замена должна выполняться на основе тщательного технико-экономического анализа с учетом «капитализированных» потерь электроэнергии в трансформаторе за весь срок его службы.

4. С учетом большого срока окупаемости и значительных капиталовложений, модернизацию (замену) трансформаторов целесообразно производить в несколько этапов, с привлечением инвестиций, с учетом финансового состояния предприятия.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Интернет ресурс: <http://toosghk.kz/page/history>
2. Интернет ресурс: <http://toosghk.kz/news/view/283>
3. Интернет ресурс: <http://toosghk.kz/news/view/5>
4. Интернет ресурс: <http://toosghk.kz/news/view/17>
5. Джанардхан В., Галлоуэй. 10 путей снижения потерь в распределительных трансформаторах//ElectricLight& Power, v. 79, № 10, 2001. - С. 26.
6. Бер.Современная технология трансформаторостроения и тенденция разработок на будущее // Электра,№ 198, 2001. С. 13-19.
7. Бекли, доктор философии.Современная электротехническая сталь // PowerEngen., v.13, № 4, 1999. - С. 190-200.
8. Проблемы создания и применения в электрических сетях устройств, использующих явления сверхпроводимости // В.В. Дорофеев, В.А. Черноплеков, В.Е. Кейлин и др.// Электричество, № 7, 2005. - С. 22-30.
9. Шахидехпур. Прогресс в применении сверхпроводников для передачи электроэнергии // Журнал IEEE Power&nd Energy Journal,3, № 2, 2005. - С.17-19.
10. Цырук С.А., Киреева Э.А. Повышение эксплуатационной надежности силовых трансформаторов, отработавших нормативный срок службы // Промышленная энергетика, № 3, 2008.
11. Алексеев Б.А. Крупные силовые трансформаторы. Конструкции и производство // Энергетика за рубежом. Приложение к журналу «Энергетик», вып. 2, 2007.

**REFERENCE**

1 Internet resource: http://toosghk .kz/page/history [in Russian]

2 Internet resource: <http://toosghk.kz/news/view/283> [in Russian]

3 Internet resource: <http://toosghk.kz/news/view/5> [in Russian]

4 Internet resource: <http://toosghk.kz/news/view/17> [in Russian]

5 JanardhanV., GallowayD. 10 ways to reduce losses in distribution transformers//ElectricLight& Power, v. 79, No. 10, 2001. - p. 26. [in Russian]

6 BaehrR. Modern technology of transformer construction and the trend of developments for the future //Electra, No. 198, 2001. pp. 13-19. [in Russian]

7 BeckleyPh. Modern electrotechnical steel // PowerEngen., v.13, No. 4, 1999. - pp. 190-200. [in Russian]

8 Problems of creation and application in electrical networks of devices using superconductivity phenomena // V.V. Dorofeev, V.A. Chernoplekov, V.E. Keilin et al. // Electricity, No. 7, 2005. - pp. 22-30. [in Russian]

9 ShahidenpourM. Progress in the use of superconductors for electric power transmission // IEEEPower&ndEnergyMagazine, v. 3, No. 2, 2005. - pp.17-19. [in Russian]

10 Tsyruk S.A., Kireeva E.A. Improving the operational reliability of power transformers that have fulfilled the standard service life // Industrial Power Engineering, No. 3, 2008. [in Russian]

1. Alekseev B.A. Large power transformers. Designs and production // Energy abroad. Appendix to the magazine "Energetik", issue 2, 2007. [in Russian]

**К.Б Дымков1\*, Е.В. Иванова2**

1Степногорск тау-кен химия комбинаты, Қазақстан

2Инновациялық Еуразия университеті, Қазақстан

**КҮШТІК ТРАНСФОРМАТОРЛАРДЫ ЖАҢҒЫРТУ ЕСЕБІНЕН ЭЛЕКТРМЕН ЖАБДЫҚТАУ ЖҮЙЕСІНІҢ ТИІМДІЛІГІН АРТТЫРУ**

*Негізгі проблема:* баяндама пайдалы қазбаларды өндіру және қайта өңдеу кәсіпорнында электрмен жабдықтау және электр тұтыну жүйесінің тиімділігін зерттеуге және талдауға арналған. Жұмыста әр түрлі трансформаторлардың параметрлері мен сипаттамалары қарастырылады, олардың энергетикалық тиімділігіне салыстырмалы баға беріліп, энергия тиімділігін арттыру жолдары көрсетілген.

*Түйінді сөздер*: энергия тиімділігі, электр тұтыну процесі, электрмен жабдықтау процесі, энергия-технологиялық сипаттамалары, жаңғырту.

**К..B Dymkov1\*, E. V. Ivanova 2**

1Stepnogorsk mining and chemical combine, Kazakhstan

2Innovation Eurasian University, Kazakhstan

**IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE POWER SUPPLY SYSTEM DUE TO THE MODERNIZATION OF POWER TRANSFORMERS**

*The main problem:* The report is devoted to the study and analysis of the efficiency of the power supply and power consumption system at the enterprise for the extraction and processing of minerals. The paper considers the parameters and characteristics of various types of transformers, gives a comparative assessment of their energy efficiency, and outlines ways to improve energy efficiency.

*Keywords:* energy efficiency, power consumption process, power supply process, energy technological characterist.

**Дата поступления рукописи в редакцию:** 30.05.2022 г.