

И.Я. ЧЕРНОВ, инж.,
С.В. КАРАСЬ, д-р техн. наук

ПОИСК И РЕАЛИЗАЦИЯ ПУТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ ВЗРЫВОБЕЗОПАСНЫХ КТП ПРИ ПОВЫШЕНИИ МОЩНОСТИ ДО 1600 кВ·А

Проведено пошук і реалізовані шляхи підвищення технічного рівня комплектних пересувних вибухобезпечних трансформаторних підстанцій для електрозабезпечення потужних вуглевидобувних комплексів шахт при підвищенні їхньої одиничної потужності до 1600 кВ·А.

Проведен поиск и реализованы пути повышения технического уровня комплектных передвижных взрывобезопасных трансформаторных подстанций для электрообеспечения мощных угледобывающих комплексов угольных шахт при повышении их единичной мощности до 1600 кВ·А.

Постановка проблеми. Современный этап развития топливно-энергетического комплекса Украины характеризуется ориентацией на увеличение доли каменного угля в общем объеме добычи и производства энергоносителей.

Увеличение угледобычи возможно за счет концентрации горных работ, применения современного оборудования (высокопроизводительных очистных и проходческих комплексов) в высоконагруженных лавах, позволяющих выдавать из них по 5 и более тыс. тонн угля в сутки [1].

Важнейшим элементом системы шахтного электроснабжения мощных угледобывающих комплексов, включающей в себя практически все элементы существующего электрооборудования – силовые коммутационные аппараты, устройство преобразования электроэнергии, элементы управления, защиты, сигнализации и контроля, является передвижная комплектная взрывобезопасная трансформаторная подстанция (КТП), создание которой является важной и актуальной научно-технической задачей.

Анализ исследований и публикаций. Развитие угольной отрасли в двадцатом веке, как в нашей стране, так и за рубежом, в большой степени обязано последовательной замене энергии пара и пневматической энергии на электрическую.

Электрификация угольных предприятий прошла поэтапно применение электроэнергии, вначале на поверхностном комплексе, в околоствольных дворах и в других местах, где отсутствует взрывоопасная атмосфера, вплоть до полной механизации и автоматизации, как отдельных процессов, так и технологических комплексов угледобычи и доставки горной массы на поверхность.

Основными препятствиями широкому применению электрической энер-

гии в шахтах явились наличие рудничного взрывоопасного газа метана и угольной пыли, опасность возникновения пожара в условиях ограниченного пространства, поражение персонала электрическим током. Рудничное взрывобезопасное электрооборудование, включающее в себя передвижные КТП, коммутационную и защитную электроаппаратуру, если не исключило полностью опасность ведения горных работ, то в значительной степени ослабило её влияние и явилось важным фактором развития и неуклонного роста энерговооруженности труда и производительности угольных предприятий.

На начальном этапе внедрения электроэнергии на угольных шахтах электроснабжение угледобывающих участков осуществлялось от стационарной трансформаторной подстанции, размещенной в камере, закреплённой огнестойким материалом, в которой устанавливался маслонаполненный трансформатор [2].

Из-за высокой стоимости перемещение подстанций (камеры и находящегося в ней электрооборудования) осуществлялось один или два раза в год, что приводило к увеличению длины кабельных линий и к снижению напряжения на зажимах электроприёмников, предопределяя снижение эффективности механизации и автоматизации производства.

Начиная с пятидесятих годов прошлого столетия, в нашей стране и за рубежом велись исследовательские работы по поиску технических решений, обеспечивающих глубокий ввод напряжения 6 кВ, создание взрывобезопасных КТП, располагаемых вблизи лавы и перемещаемых вслед за ней.

В конце пятидесятих годов в МакНИИ были проведены детальные исследования свойств кварцевого заполнителя для создания безмасляных КТП и определены исходные данные для проектирования взрывобезопасных кварцenaполненных трансформаторов. Конструкция этих трансформаторов и созданных на их основе передвижных подстанций типа ТКШВП, не требующих специальных камер, представлена на рис. 1. В процессе разработки таких подстанций был применен ряд технических решений, направленных на обеспечение их надёжности и безопасности применения в условиях взрывоопасной среды и повышенной влажности. Был предложен способ гидрофобизации песка и обоснована необходимость его классификации, усовершенствована система изоляции, разработана электрическая схема, обеспечивающая безопасность эксплуатации КТП в шахтных условиях [3].

На основе опыта и достижений науки и техники в нашей стране и за рубежом в 1957 г. была создана первая опытная партия сухих с воздушным охлаждением трансформаторов и подстанций, оборудованных автоматическим выключателем, в которых были предусмотрены: защита от утечек тока на землю, максимальная токовая защита, необходимые блокировки.

С конца шестидесятих годов выпуск сухих с воздушным охлаждением трансформаторов и КТП был сосредоточен на Донецком энергозаводе (ДЭЗ).

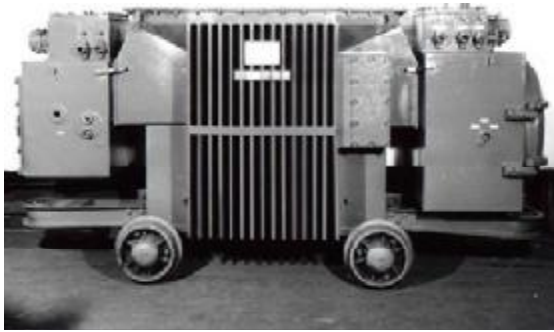


Рис. 1. Кварцenaполненная передвижная трансформаторная подстанция типа ТКШВП мощностью 320 кВ·А (1960 г.)

За это время ДЭС выпущена серия трансформаторов типа ТСШВ и КТП типа ТСШВП. С восьмидесятых годов эта серия трансформаторов и КТП была заменена серией ТСВ и ТСВП. Выпуск которых на ДЭС достигал 2,5-3 тысяч изделий в год.

С целью прогнозирования потребности в новых разработках КТП УкрНИИВЭ произведен ретроспективный анализ динамики энерговооруженности очистных работ угольных шахт стран СНГ и создания соответствующих КТП. На рис. 2 приведены данные об установленной мощности электродвигателей добычных технологических комплексов основного забойного оборудования с учетом применения высокопроизводительных добычных комбайнов, проанализированы основные этапы создания КТП [4].

Поскольку совершенствование систем электроснабжения выемочных участков определялось соответствующим созданием и внедрением новых машин и технологий угледобычи, в [5] прослеживаются следующие основные этапы их развития (рис. 2):

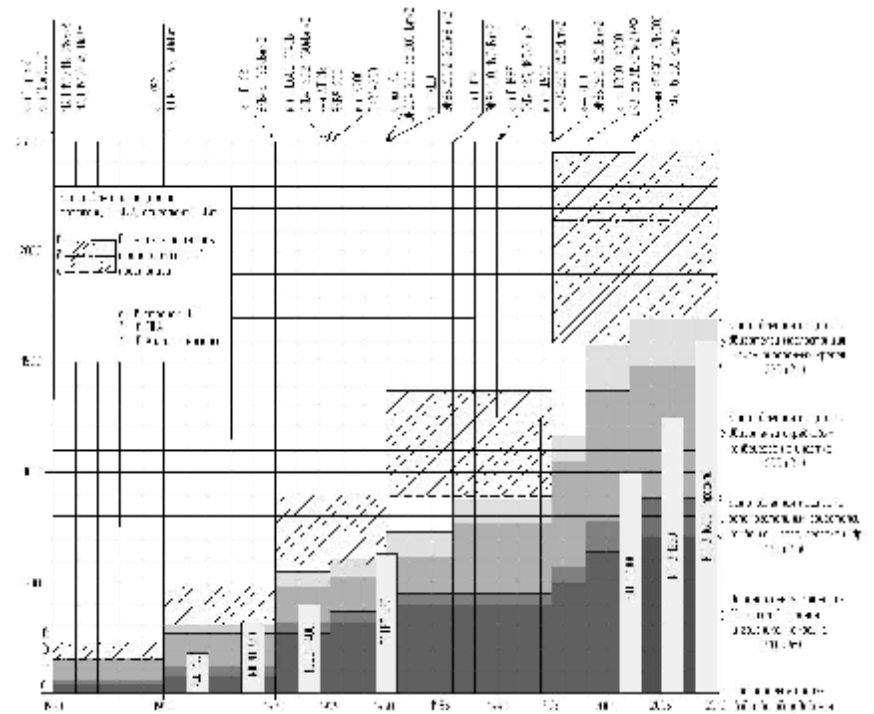


Рис. 2. Динамика роста энерговооруженности

- период до 1950 г. – завершена механизация зарубки угля с помощью врубмашин (с необдуваемыми двигателями МА, МАД) при буровзрывной его отбойке, ручной навалке и доставке качающимися конвейерами;
- период 1951-1960гг. – внедрение широкозахватных угольных комбайнов, в основном, с необдуваемыми двигателями МА, МАД и ЭДК на напряжение 380/660 В, а также разборных скребковых конвейеров;
- период 1961-1975 гг. – внедрение узкозахватных добычных комбайнов с двигателями водяного и воздушного охлаждения ЭКВ и ЭДКО на напряжение 660 В, с механизированными крепями и передвижными изгибающимися скребковыми конвейерами;
- период 1975-1995 гг. – совершенствование механизированных комплексов второго поколения и применение электродвигателей на напряжение 660/1140 В;
- период с 1995 г. – реструктуризация углепрома с закрытием нерентабельных шахт и внедрением на перспективных шахтах механизированных комплексов третьего поколения; создание двигателей ЭКВ с увеличенной мощностью в т.ч. с поперечным расположением их на комбайне, дальнейшее увеличение энерговооруженности угледобывающей техники.

Цель статьи. Поиск путей повышения единичной мощности передвиж-

ных КТП до 1600 кВ·А во взаимосвязанной системе "угледобыча – энерговооруженность угледобывающей техники – мощность КТП", расширение функциональных возможностей, эксплуатационной надежности и безопасности.

Результаты исследований. С увеличением единичной мощности до 1600 кВ·А, при существующих электромагнитных нагрузках активных материалов (плотности тока в обмотках и индукции в магнитопроводе) их масса возрастает пропорционально кубу линейных размеров, а внешняя охлаждающая поверхность растёт пропорционально квадрату линейных размеров, поэтому рост охлаждающей поверхности активной части недостаточен при растущих единичной мощности и мощностях потерь, что требует повышения эффективности охлаждения. Рост потерь мощности в активной части влечёт за собой необходимость снижения влияния выделяемого тепла на сопряжённые полости корпуса, в связи с тем, что установленная в РУНН и РУВН аппаратура допускает нагрев до определенных значений.

Для обеспечения взрывобезопасности КТП с увеличением её мощности ужесточаются требования к конструкции корпуса и технологии его изготовления.

Многовекторность рассматриваемых задач по удовлетворению требований обеспечения взрывобезопасности, эффективного охлаждения активной части и сопряженных с корпусом трансформатора оболочек, обуславливает необходимость комплексного подхода к решению этих вопросов.

Отметим, что закон роста мощности трансформатора, установленный М.О. Доливо-Добровольским и окончательно сформулированный М. Видмаром, фактически не приемлем для трансформаторов, размещаемых в герметичных оболочках. Многочисленные исследования серийных, макетных и опытных образцов КТП показывают, что мощность активной части, помещённой во взрывонепроницаемую оболочку, снижается на 27...34 %. В связи с этим возникает необходимость разработки системы охлаждения, позволяющей снизить экранирующее влияние оболочки на тепловое состояние активной части. Причем, обеспечение технических характеристик передвижных КТП возможно не только путём разработки передовых конструкторских решений, но и за счёт применения современных технологий и электротехнических материалов.

С увеличением мощности КТП и ростом мощности короткого замыкания шахтной системы электроснабжения до 100 МВ·А определенную трудность представляет собой разработка устройств крепления обмоток на стержнях магнитопровода трансформатора в связи со значительными электродинамическими усилиями, возникающими при пусках асинхронных электродвигателей соизмеримых с трансформатором мощностей и значительных токах короткого замыкания в шахтных электрических сетях.

Остановимся на наиболее, как представляется, значимых вопросах.

Взрывобезопасные передвижные трансформаторные подстанции традиционно состоят из трех основных частей: – силового трансформатора; – распределительного устройства высшего напряжения (РУВН); – распределительного

тельного устройства низшего напряжения (РУНН).

Все составные части соединены между собой взрывонепроницаемыми соединениями и расположены на общей раме.

Силовые трансформаторы для подстанций типа КТПВ выполнены на электротехнических материалах, производимых в конце 80-х гг. прошлого столетия. Это электротехнические стали с удельными потерями не ниже 1,2 ÷ 1,4 Вт/кг, электроизоляционные материалы не выше класса нагревостойкости Н.

На сегодняшний день серийно выпускаются новые электротехнические материалы, активно используемые в современных конструкциях: электротехнические стали с удельными потерями до 0,9 Вт/кг, электроизоляционные материалы класса нагревостойкости 220 с высокой электрической прочностью.

Заметных успехов достигла технология изготовления элементов конструкции общепромышленных трансформаторов, а именно:

- изготовление магнитопровода с "косым стыком" (по типу Step – Lap);
- пропитка обмоток методом "вакуум-давление";
- применение обмоточных проводов с изоляцией арамидной бумагой, полиимидной пленкой, работающих в длительном режиме при температуре более 200 °С;
- применение конструкций обмоток прямоугольной и овальной формы;
- применение обмоток из медной ленты, благодаря чему существенно повышается их электродинамическая стойкость.

Имеются сведения, что рядом производителей КТП критерием оценки мощности принимается срок службы трансформатора, определяемый с учетом графика нагрузки. В связи с этим, при создании взрывобезопасных трансформаторов повышенной единичной мощности (1000, 1250 и 1600 кВ·А) можно заметно увеличить электромагнитные нагрузки на элементы конструкции трансформатора и тем самым снизить расход активных материалов, трудозатраты, массу и габариты силового трансформатора, и, таким образом, при снижении потерь и увеличении электродинамической стойкости сохранить неизменной мощность.

На рис. 3 и 4 показано изменение расхода меди и электротехнической стали в трансформаторах подстанций ТСШВП (1974 г), КТПВ (2002 г) и трансформаторов нового поколения. Согласно предварительным расчетам с учетом предлагаемых конструктивных решений расход активных материалов может быть снижен: меди до 10 %, электротехнической стали до 12 %.

Для выбора оптимизированных конструкций силовых трансформаторов (в зависимости от их типоразмера) с учетом существующих тенденций развития трансформаторостроения [6, 7] были проведены аналитические исследования (на примере силового трансформатора мощностью 1000 кВ·А) по эффективности:

- применения электротехнической стали с низкими удельными потерями (например, 3409) и систем электроизоляционных материалов высоких классов нагревостойкости (например, 200, 220);
- разработки конструкции трансформатора, обеспечивающей минимальные потери холостого хода и короткого замыкания.

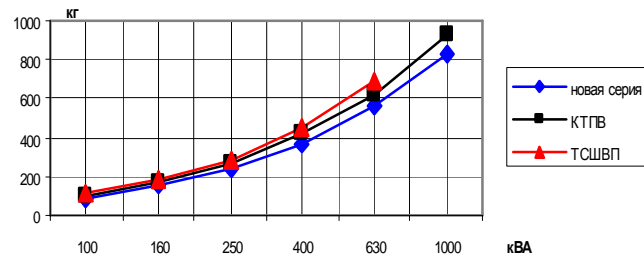


Рис. 3. Расход обмоточного провода

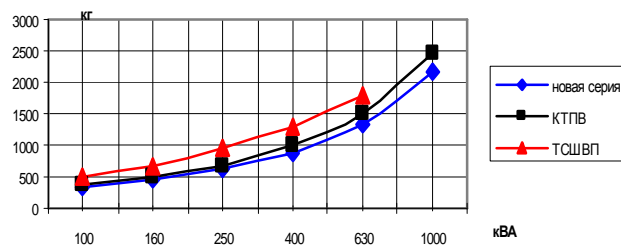


Рис. 4. Расход электротехнической стали

– перераспределения электромагнитных нагрузок и совершенствования конструкции трансформатора с учетом изменившейся ценовой политикой на электротехнические материалы;

- создания новых систем изоляции и охлаждения;
- совершенствования технологии изготовления трансформатора;

Из всего многообразия вариантов расчета с изменением марки стали, индукции в стержнях магнитопровода, плотности тока в обмотках, марок провода и электроизоляционных материалов были отобраны наиболее приемлемые варианты конструкции трансформатора.

За основу анализа приняты расчетные данные четырех вариантов конструкции активной части трехфазного трансформатора (рис. 5), в которых варьировался диаметр стержня, вид магнитопровода, обмоток, индукция и плотность тока.

На рис. 6 приведены диаграммы потерь холостого хода и короткого замыкания по пяти расчетным вариантам, а также каталожные данные трансформатора фирмы Siemens (вариант 4б), как изделия с заявленными низкими электромагнитными потерями и сравнение их с расчетным вариантом 1, а также диаграммы расхода электротехнических материалов по пяти расчетным вариантам и сравнение их с расчетным вариантом 1 (серийной конструкцией).

На диаграммах показан характер изменения массы электротехнических материалов, потерь холостого хода и короткого замыкания в зависимости от варианта конструкции активной части, дающий общее представление о достоинствах каждого из них.

Для оценки анализируемых вариантов расчета трансформатора с позиций их инвестиционной привлекательности выполнен расчет технико-экономического эффекта от внедрения трансформаторов.

1. Экономический эффект у изготовителя определяется по разнице затрат на изготовление заменяемого и нового трансформаторов (трудозатраты принимаются одинаковыми и в расчете не учитываются):

$$\mathcal{E}_u = C_{C1} \times G_{C1} - C_{C2} \times G_{C2} + C_{M1} \times G_{M1} - C_{M2} \times G_{M2} + C_{u1} - C_{u2}; \quad (1)$$

где \mathcal{E}_u – экономия затрат за счет нового трансформатора у изготовителя, грн; C_{C1} – цена электротехнической стали заменяемого трансформатора, грн; C_{C2} – цена стали нового трансформатора, грн; C_{M1}, C_{M2} – цена меди заменяемого и нового трансформаторов, грн; C_{u1}, C_{u2} – стоимость изоляционных материалов заменяемого и нового трансформаторов, грн; $G_{C1}, G_{C2}, G_{M1}, G_{M2}$ – соответственно масса стали и обмоточной меди заменяемого и нового трансформаторов, кг.

2. Экономический эффект у потребителя определяется как разность затрат заменяемого и нового трансформатора на потребляемую электроэнергию (потери в стали и меди):

$$\mathcal{E}_u = P_1 \times C_{\mathcal{E}} \times Q - P_2 \times C_{\mathcal{E}} \times Q; \quad (2)$$

где \mathcal{E}_u – экономия у потребителя, грн; P_1, P_2 – потребление электроэнергии заменяемым и новым трансформаторами, кВт; $C_{\mathcal{E}}$ – стоимость электроэнергии, грн/кВт·ч; Q – продолжительность работы трансформатора, ч.

При этом следует учитывать, что потери в стали трансформатора не изменяются с течением времени (смена, сутки), а потери в меди пропорциональны квадрату тока нагрузки, поэтому зависимость (2) приобретает вид:

$$\mathcal{E}_u = \left[(P_{10} \times Q_0 + P_{1к} \times Q_n \times \beta^2) - (P_{20} \times Q_0 + P_{2к} \times Q_n \times \beta^2) \right] \times C_{\mathcal{E}}, \quad (3)$$

где P_{10}, P_{20} – соответственно потери в стали заменяемого и нового трансформатора, кВт; Q_0 – продолжительность работы на холостом ходу, ч; $P_{1к}, P_{2к}$ – соответственно потери в меди заменяемого и нового трансформатора, кВт; Q_n

– продолжительность нагрузки, ч; $\beta = \frac{I_{нагр}}{I_n}$ – коэффициент нагрузки (отношение тока нагрузки к номинальному току);