

УДК 621.321

## Реконструкция открытых распределительных устройств подстанций 110 кВ на основе применения вакуумных выключателей и компактных блочно-модульных конструкций

Назарычев А.Н., д-р техн. наук, Андреев Д.А., канд. техн. наук, Сулыненков И.Н., ассист.,  
Панков Д.Л., Жулина Т.А., инженеры

Рассматривается проблема реконструкции открытых распределительных устройств подстанций 110 кВ. Предлагается использовать вакуумные выключатели и компактные блочно-модульные конструкции при строительстве новых подстанций, реконструкции и техническом перевооружении действующих. Уделяется внимание реконструкции подстанций с отделителями и короткозамыкателями.

*Ключевые слова:* техническое перевооружение, компактные блочно-модульные конструкции, схемы распределительных устройств, надежность.

## Reconstruction of 110 kV Open Distribution Devices on Basis of Application of Vacuum Circuit Breaker and Compact Modular Construction

A.N. Nazarychev, Doctor of Engineering, D.A. Andreev, Candidate of Engineering, I.N. Sulynenkov, Assistant,  
D.L. Pankov, T.A. Zhulina, Engineers

The authors consider the technical reconstruction problems of 110 kV open distribution devices of substations. It is proposed to use vacuum circuit breakers and compact modular constructions in building the new substations, reconstructions, and technical rearmament. The authors pay attention reconstruction of substations with disconnectors and short-circuit switches.

*Key words:* technical rearmament, compact modular constructions, distributive devices schemes, reliability.

Основные направления реконструкции и технического перевооружения (ТП) подстанций (ПС) распределительных сетей России изложены в Положениях о технической политике в распределительном электросетевом комплексе [1], а определение предельного срока эксплуатации оборудования ПС и обоснование очередности ТП дано в монографии [2]. Важнейшим требованием к развитию распределительных устройств (РУ) современных ПС является удовлетворение потребителей электрической энергией (мощностью) при обеспечении высокого уровня надежности и безопасности. Достижение высоких показателей надежности и безопасности возможно на основе системы требований и применения различных современных и инновационных технических решений, среди которых, прежде всего, следует выделить использование:

- новейшего электротехнического оборудования повышенной надежности;
- цифровых технологий управления режимами работы основного электрооборудования;
- самодиагностики и мониторинга состояния электрооборудования, сбора, обработки и передачи данных;
- дистанционного управления коммутационными аппаратами;
- открытого или закрытого исполнения РУ 110 кВ;
- компактных ячеек и, как правило, жесткой ошиновки заводской комплектации;

- элегазовых и вакуумных аппаратов для РУ 110 кВ открытого исполнения и элегазовых РУ закрытого исполнения – в населенных пунктах с плотной и старой застройкой, культурно-исторических центрах;

- необслуживаемого оборудования или со сниженным объемом регламентных работ;
- стратегии эксплуатации и ремонта оборудования по техническому состоянию;
- микропроцессорных терминалов защиты и противоаварийной автоматики;
- комплектов укрупненных функциональных блоков полной или повышенной заводской готовности;
- решений по исключению (сведению к минимуму) пожаров, взрывов и отрицательных экологических воздействий на окружающую среду.

Современные «Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35–750 кВ» [3] принципиально позволяют проектировать ПС нового поколения, отвечающие приведенным требованиям. При этом конструкция ПС, с учетом ее назначения, класса напряжения и числа присоединений, должна соответствовать типовым принципиальным электрическим схемам РУ напряжением 6–750 кВ и указаниям по их применению, изложенным в [4]. Однако конкретные условия строительства ПС в различных климатических районах страны, городах, сельской местности и для различных потребителей могут отличаться рядом особенностей. Прежде

все, это тенденция к сокращению площади, отводимой для сооружения ПС, особенно в городах, которая накладывает дополнительные требования на компоновку РУ.

Другая особенность связана с отказом от схем РУ с избыточным соотношением количества высоковольтных выключателей и числа присоединений и переходом к упрощенным схемам РУ с малым числом выключателей, с применением на ПС комплектных, блочных и модульных конструкций.

Еще одной особенностью размещения ПС в городах и на территориях предприятий различных отраслей промышленности являются требования экологичности, эргономики, промышленной и пожарной безопасности, что также необходимо учитывать при выборе конструкции схемы РУ.

В последние годы в решении задачи совершенствования конструкции схем ПС, с учетом различных особенностей их размещения и длительной эксплуатации, достигнуты определенные успехи. Тем не менее имеются возможности для дальнейшего развития конструкции схем РУ ПС 110 кВ на основе применения вакуумного коммутационного оборудования. Конструкция, перспективы и преимущества применения вакуумных выключателей 110 кВ изложены в [5], где рассмотрены двухразрывные и одноразрывные вакуумные выключатели производства ОАО «НПП «Контакт»». Следует отметить, что новые решения могут быть основаны на разработанных и выпускаемых компактных модульных блоках:

- УВО (открытое вводное устройство) – ОАО «НПП «Контакт»» [6];

- КМ-ОРУ (компактный модуль открытого РУ) – ЗАО «ЗЭТО» [7].

Устройство УВО представляет собой набор высоковольтной аппаратуры, размещенной на металлическом каркасе. Для обеспечения возможности управления и измерения параметров работы оборудования устройство содержит вспомогательные цепи, выведенные на блок зажимов, размещенный в шкафу соединений с закрываемой на замок дверью. Устройство УВО может изготавливаться по опросным листам в различной комплектации.

Компактный модуль открытого распределительного устройства КМ-ОРУ состоит из опорных металлоконструкций 1 (рис. 1), элементов жесткой ошиновки с применением полимерных изоляторов 2 типа ОСК-10-110, трехполюсного двухразрывного или одноразрывного вакуумного выключателя 3, трансформатора тока 4, разъединителя шинного 5, разъединителя линейного (трансформаторного) 6.

Особенностью конструкции КМ-ОРУ является применение не требующего обслуживания подвесного шинного разъединителя, который позволяет создавать схемы РУ с одним выключателем на две рабочие системы шин. Такое решение является более надежным по сравнению с зарубежным вариантом на основе применения выкатного выключателя, совмещающего функции разъединителя. При этом в случае необходимости ремонтные работы на выключателе и трансформаторе тока в КМ-ОРУ можно проводить без погашения системы сборных шин в полном соответствии с требованиями действующих правил по электробезопасности.

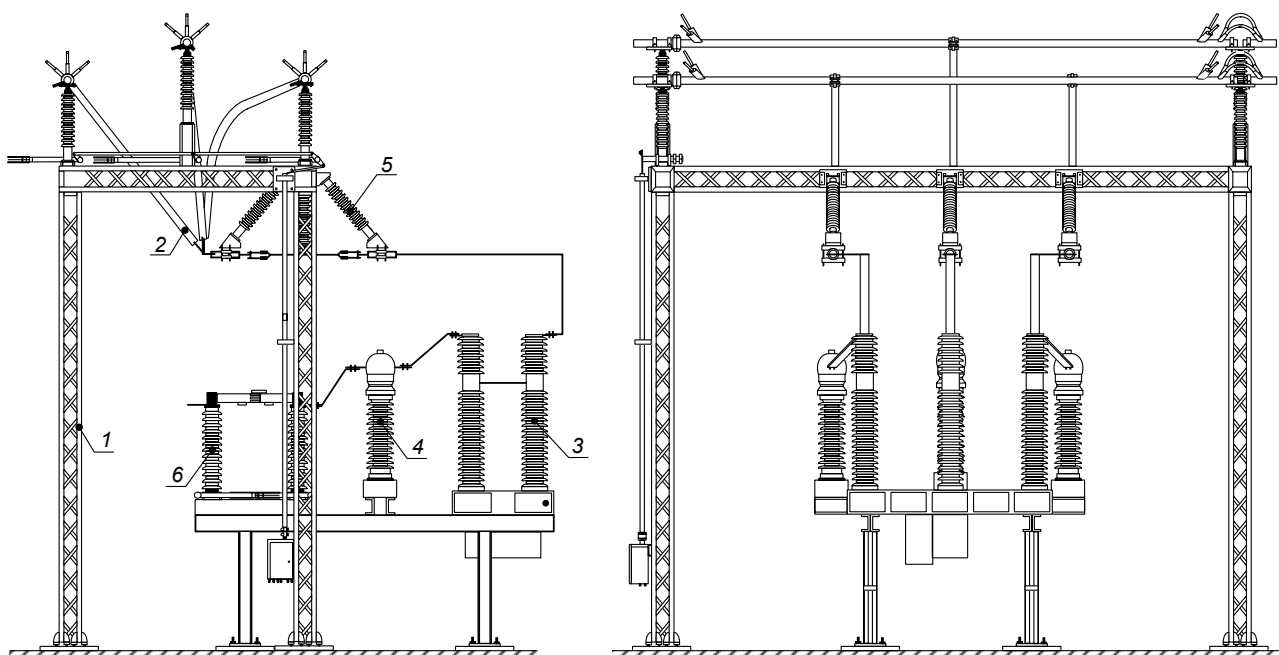


Рис. 1. Компактный модуль открытого распределительного устройства КМ-ОРУ-110 с вакуумным выключателем: 1 – опорные металлоконструкции; 2 – жесткая ошиновка; 3 – вакуумный выключатель ВБП-110; 4 – трансформатор тока; 5 – шинный разъединитель; 6 – линейный (трансформаторный) разъединитель

Уникальные разработки ОАО «НПП «Контакт» и ЗАО «ЗЭТО» совместно с предлагаемыми решениями по установке в блоки УВО и КМ-ОРУ двухразрывного или одностороннего вакуумного выключателя позволяют создавать конструкции открытых схем РУ напряжением 110 кВ с принципиально новыми свойствами. При этом создается не только реальная альтернатива применению элегазовых выключателей в этом классе напряжения, но и возможность реального внедрения на обслуживаемых на протяжении всего срока службы, экологически чистых, пожаробезопасных открытых РУ 110 кВ и, по сути, создания новых блочно-модульных схемных решений, обеспечивающих:

- высокую степень надежности и безопасности эксплуатации;
- экологическую безопасность оборудования;
- повышенный уровень заводской готовности и укрупнение блоков поставки;
- максимальное уменьшение массогабаритных показателей;
- сокращение эксплуатационных расходов и обеспечение удобства выполнения технического обслуживания и ремонта;
- развитие необслуживаемых, дистанционно управляемых цифровых подстанций;
- создание комплектных и закрытых РУ (КРУ и ЗРУ) с воздушной и комбинированной изоляцией, без использования элегаза.

На первом этапе реализацию разработанных решений предлагается связать с программой замены масляных выключателей и пар отделитель-короткозамыкатель (ОД-КЗ) 110 кВ. Как правило, схема с ОД-КЗ применяется для РУ ответвительных или тупиковых (при наличии ответвлений от питающих линий) понизительных ПС напряжением 110 кВ при трансформаторах мощностью до 25 МВА и расположении подстанций в климатической зоне, в которой средняя температура из абсолютных минимумов не ниже  $-45^{\circ}\text{C}$ .

Рассмотрим ПС, выполненную по схеме «Два блока с ОД-КЗ и неавтоматической перемычкой со стороны линий» (рис. 2), которая имеет 4 присоединения: две линии W1 и W2; два трансформатора T1 и T2. Само РУ представляет собой два одинаковых блока, состоящих из следующих элементов: линейный разъединитель QS1 (QS2); отделитель QR1 (QR2); короткозамыкатель QN1 (QN2); трансформаторный разъединитель QS5 (QS6). Блоки связаны между собой неавтоматической перемычкой, состоящей из двух последовательно включенных разъединителей QS3 и QS4. Неавтоматическая перемычка при нормальном состоянии схемы разомкнута. Она используется при отказе или выводе в ремонт одной из линий для обеспечения питания обоих трансформаторов от оставшейся в работе линии.

Установка в перемычке сразу двух разъединителей дает возможность вывода в ремонт любого из них без отключения обеих линий или без частичного демонтажа ошиновки, которой разъединитель связан с двумя блоками, при поочередном отключении каждой линии.

Все операции коммутации нагрузочных токов в схеме производятся выключателями, установленными по низкой стороне трансформаторов. Отключение и включение токов холостого хода трансформатора осуществляется соответственно отделителем QR1 (QR2) и разъединителем QS5 (QS6). Линейные разъединители QS1 и QS2 предназначены для вывода в ремонт соответственно линий W1 и W2.

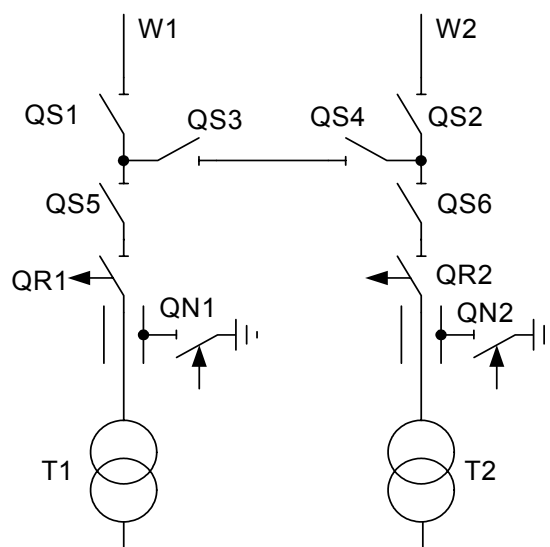


Рис. 2. Схема «Два блока с отделителями и неавтоматической перемычкой со стороны линий»

Отключение токов короткого замыкания осуществляется выключателями, установленными в начале двух питающих линий. Однако чувствительность устройств релейной защиты (P3) этих выключателей зачастую оказывается недостаточной для защиты всего трансформатора, особенно если от линий осуществляется питание большого количества ответвительных ПС. Для обеспечения надежного отключения поврежденного трансформатора на ПС устанавливается короткозамыкатель, который автоматически включается от релейной или газовой защиты, создавая искусственное короткое замыкание. Ток на головном участке линии значительно увеличивается, устройства P3 становятся чувствительными к повреждению и подают команду на отключение. После отключения линии выключателем автоматически отключается отделитель, и к моменту автоматического повторного включения (АПВ) поврежденный трансформатор оказывается отключенным. В результате неповрежденные ПС, питающиеся по данной линии, отключаются лишь на время безтоковой паузы АПВ.

Схема «Два блока с ОД-КЗ и неавтоматической перемычкой со стороны линий» вы-

полнена без выключателей, что позволяет значительно снизить ее стоимость и упростить эксплуатацию.

Современными нормами технологического проектирования ПС [3] эта схема запрещена к применению. Связано это с тем, что, наряду с приведенными выше достоинствами, схема обладает существенными недостатками. Практика показала, что пара ОД-КЗ имеет конструктивные дефекты и эксплуатационные недостатки, которые значительно снижают надежность питания потребителей. В результате снижение затрат и улучшение эксплуатационных свойств схем с ОД-КЗ зачастую не окупает увеличение ущерба от перерывов в электроснабжении потребителей.

Альтернативой для этой схемы является схема «Два блока с выключателями и неавтоматической перемычкой со стороны линий» (так называемая схема 4Н) (рис. 3), основным отличием которой является использование более дорогостоящего, но и более надежного выключателя вместо связки из двух дешевых, но менее надежных аппаратов ОД-КЗ.

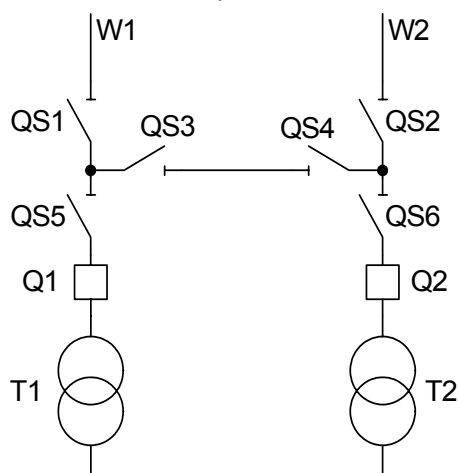


Рис. 3. Схема «Два блока с выключателями и неавтоматической перемычкой со стороны линий»

Схема РУ, выполненная с выключателями (рис. 3), представляет собой два одинаковых блока, состоящих из следующих элементов: линейный разъединитель QS1 (QS2); вы-

ключатель Q1 (Q2); трансформаторные разъединители QS5 (QS6). Блоки связаны между собой неавтоматической перемычкой, состоящей из двух последовательно включенных разъединителей QS3 и QS4. Назначение данной перемычки аналогично ее назначению для предыдущей схемы (рис. 3).

Все операции коммутации нагрузочных токов, а также операции отключения и включения токов холостого хода трансформатора в схеме производятся выключателями Q1 и Q2. В результате снижается скорость сработки механического ресурса выключателей, установленных по низкой стороне трансформатора.

Отключение токов короткого замыкания при повреждении внутри трансформатора и на его выводах осуществляется выключателями Q1 и Q2. В результате не происходит даже кратковременного перерыва в электроснабжении неповрежденных ПС, а надежность питания смежных ПС не зависит от слаженности и четкости работы пары ОД-КЗ. Наряду с этим снижается количество коммутаций, производимых выключателем, установленным в начале линии, что увеличивает его безотказность и, соответственно, надежность всей питающей сети в целом.

Проанализируем надежность приведенных схем (рис. 2, 3). В качестве коммутационных аппаратов последней схемы приняты вакуумные выключатели. Экспертные оценки показателей надежности элементов схем РУ приведены в табл. 1.

Для сопоставительного расчета схем РУ воспользуемся таблично-логическим методом. Он основан на выявлении наиболее вероятных расчетных аварий, под которыми понимаются:

- отказ одного (каждого по отдельности) из элементов схемы;
- наложение отказа одного элемента на ремонт другого.

Наложение отказа одного элемента на отказы других элементов не рассматриваются ввиду их малой вероятности. Отказы, приводящие к одинаковым последствиям в обеих схемах, к рассмотрению также не принимаем.

Таблица 1. Показатели надежности оборудования

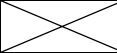
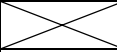
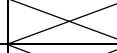
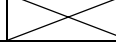
Оборудование	$\omega$ , 1/год	$T_B$ , ч	$\mu$ , 1/год	$T_P$ , ч	$q_i$ , о.е.
Трансформатор ТРДН-25 000/110	0,014	70	0,75	28	0,002509
Разъединитель 110 кВ	0,01	11	0,166	8	0,000164
Отделитель 110 кВ	0,02	3,5	0,33	10	0,000385
Короткозамыкатель 110 кВ	0,02	6	0,33	6	0,000240
Выключатель вакуумный 110 кВ	0,005	40	0,08	45	0,000434

**Примечание:**  $\omega$  – параметр потока отказов;  $T_B$  – время восстановления (среднее время проведения аварийного ремонта);  $\mu$  – частота плановых ремонтов;  $T_P$  – продолжительность проведения плановых ремонтов;  $q_i$  – вероятность нахождения элемента в ремонтном состоянии в течение года.

Рассмотрим схему «Два блока с ОД-КЗ и неавтоматической перемычкой со стороны линий» (рис. 2). Таблица надежности этой схемы приведена в табл. 2. Полное погашение ПС при нормальном состоянии схемы не возможно. Отказ любого элемента блока (линии, разъединителей, ОД-КЗ, трансформатора) приводит к отключению только одного трансформатора. Все потребители ПС в этом случае могут получать питание через оставшийся в работе трансформатор с учетом его возможной перегрузочной способности. Полное погашение ПС возможно при наложении отказа отделителя или короткозамыкателя на ремонт оборудования второго блока. Вероятность такого события для этой схемы составит

$$P = 2 \times \omega_{QR} (q_{QR} T_{B1} + q_{QN} T_{B2}) + 2 \times \omega_{QN} (q_{QR} T_{B3} + q_{QN} T_{B4}) = 0,162 \times 10^{-3}.$$

Таблица 2. Таблица надежности для схемы «Два блока с ОД-КЗ и неавтоматической перемычкой со стороны линий»

Отказавший элемент	Нормальное состояние схемы	Ремонт QR1, QN1	Ремонт QR2, QN2
QR1	—		Р <sub>ПС</sub> , Т <sub>В</sub>
QN1	—		Р <sub>ПС</sub> , Т <sub>В</sub>
QR2	—	Р <sub>ПС</sub> , Т <sub>В</sub>	
QN2	—	Р <sub>ПС</sub> , Т <sub>В</sub>	

Рассмотрим схему «Два блока с выключателями и неавтоматической перемычкой со стороны линий» (рис. 3). Таблица надежности приведена в табл. 3. Полное погашение ПС при нормальном состоянии схемы также не возможно. Отказ любого элемента блока (линии, разъединителей, выключателя, трансформатора) приводит к отключению только одного трансформатора. Все потребители ПС в этом случае могут получать питание через оставшийся в работе трансформатор с учетом его возможной перегрузочной способности. Полное погашение ПС возможно при наложении отказа выключателя на ремонт оборудования второго блока. Вероятность такого события составит

$$P = 2 \times \omega_Q q_Q T_B = 0,096 \times 10^{-3}.$$

Из этого следует, что схема с выключателями (рис. 3) на 59,7% надежнее. При этом не учитывалось снижение скорости сработки коммутационного ресурса выключателей, установленных по низкой стороне трансформаторов, и не учитывалось увеличение надежности выключателей, установленных в начале линий.

Полученные результаты характерны для вновь сооружаемых схем с нулевым сработанным ресурсом коммутационных аппаратов.

При сравнении схемы с изношенной парой ОД-КЗ и схемы с новыми выключателями разница будет более существенной.

Таблица 3. Таблица надежности для схемы «Два блока с выключателями и неавтоматической перемычкой со стороны линий»

Отказавший элемент	Нормальное состояние схемы	Ремонт Q1	Ремонт Q2
Q1	—		Р <sub>ПС</sub> , Т <sub>В</sub>
Q2	—	Р <sub>ПС</sub> , Т <sub>В</sub>	

Конструкцию схемы «Два блока с выключателями и неавтоматической перемычкой со стороны линий» предлагается выполнять с применением вакуумных выключателей, установленных в блоках УВО и КМ. На рис. 4 приведен план подстанции, выполненной по данной схеме.

Оборудование соединяется между собой жесткими или гибкими токоведущими частями, в зависимости от компоновки схемы РУ. Узлы крепления жестких соединений обеспечивают компенсацию температурных изменений длины шин.

По сравнению с другими имеющимися на рынке предложениями, блоки УВО и КМ с вакуумными выключателями обладают следующими преимуществами:

- меньшим временем на монтаж РУ ввиду высокой заводской готовности;
- удобством осмотра, обслуживания и, в случае необходимости, ремонта оборудования;
- возможностью использовать оборудование и комплектующие от любого производителя;
- меньшим числом фундаментов, снижением расходов при монтаже РУ;
- на 45 % сокращена необходимая величина пространства по сравнению с общепринятой стандартной ячейкой ОРУ (для ОРУ-110 кВ стандартная ширина шага ячейки – 9 м);
- возможностью расширения схем РУ;
- испытанные на заводе модули минимизируют испытания на месте монтажа;
- наличием различных вариантов размещения модулей, что позволяет оптимизировать конструкцию подстанции и адаптировать ее к конкретным условиям с минимальными затратами;
- компактностью и модульностью, что позволяет экономить площадь и расходы на монтаж;
- пожаробезопасностью и взрывобезопасностью.

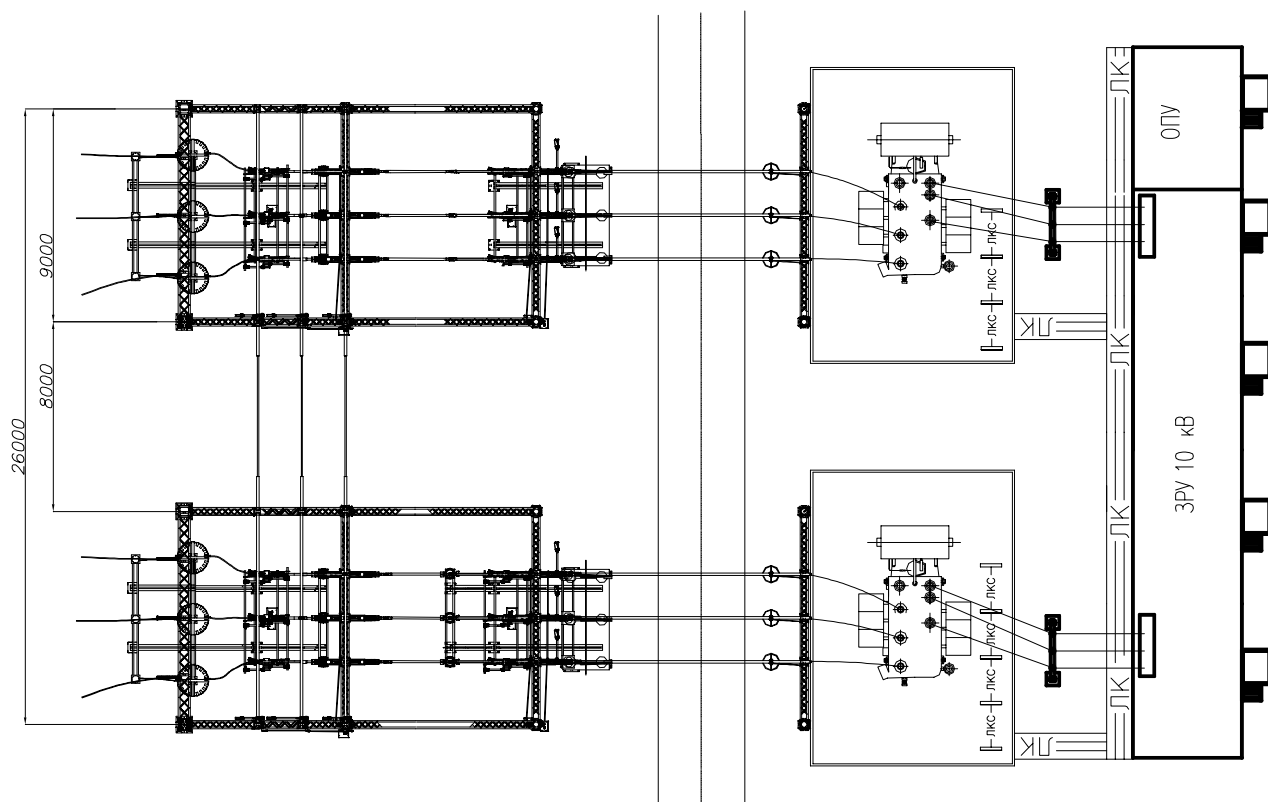


Рис. 4. План подстанции, выполненной на компактных модулях по схеме «Два блока с выключателями и неавтоматической перемычкой со стороны линий»

Применение вакуумных выключателей 110 кВ в блоках УВО и КМ может быть особенно актуальным при использовании их в необслуживаемых комплектных ПС, не содержащих масляных и элегазовых трансформаторов тока и напряжения. Такие трансформаторы тока и напряжения – с оптическими датчиками – широко используются в Северной Америке и Канаде, где вопрос экологической безопасности оборудования стоит на первом месте. Оптические трансформаторы тока и напряжения легко интегрируются в системы цифровой ПС, так как имеют на выходе цифровые сигналы.

Применение вакуумных выключателей 110 кВ в компактных модулях позволяет также развивать и совершенствовать другие схемы электрических соединений РУ. По желанию заказчика могут быть реализованы как типовые схемы РУ, так и нестандартные схемные решения для ПС различной сложности и с любым числом присоединений.

### Заключение

Проблема совершенствования конструкции открытых распределительных устройств подстанций 110 кВ является актуальной для распределительных сетей. От решения этой проблемы зависит надежность и эффективность функционирования региональных электросетевых компаний.

Решение данной проблемы может быть достигнуто на основе нового подхода, заключающегося в применении вакуумных выключателей напряжением 110 кВ и компактных, блочно-модульных конструкций при строительстве новых подстанций и техническом перевооружении действующих.

Первостепенной задачей, которая даст быстрый эффект и существенно повысит надежность распределительных сетей 110 кВ, является применение нового подхода к замене в схемах подстанций отделителей и короткозамыкателей на компактные модули с вакуумными выключателями.

### Список литературы

1. **Положение** о технической политике в распределительном электросетевом комплексе / Федеральная сетевая компания единой энергетической системы. – М., 2006.
2. **Назарычев А.Н., Андреев Д.А.** Методические основы определения предельных сроков эксплуатации и очередности технического перевооружения объектов электроэнергетики / Иван. гос. ун-т. – Иваново, 2005. – 168 с.
3. **СТО 56947007-29.240.10.028.** Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35–750 кВ. – М., 2009.
4. **Схемы** принципиальные электрические распределительных устройств подстанций напряжением 35–750 кВ. Типовые решения. – М.: Энергосетьпроект, 2006.
5. **Перспективы** применения вакуумных выключателей напряжением 110–220 кВ / А.Н. Назарычев, А.Л. Суоров, В.В. Чайка, А.И. Таджибаев // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2010. – № 1 – С. 58–63.

**6. Устройство** вводное открытое УВО. Руководство по эксплуатации КУЮЖ 674513.001РЭ. – Саратов: НПП «Контакт», 2008. – 19 с.

**7. Распределительные** устройства 110 кВ на базе компактного модуля типа КМ ОРУ. Техническое предложение. – Великие Луки: ЗАО «ЗЭТО», 2009. – 98 с.

*Назарычев Александр Николаевич,*

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования,  
телефон (4932) 38-57-94,  
e-mail: nazarythev@mail.ru

*Андреев Дмитрий Александрович,*

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
кандидат технических наук, и.о. доцента кафедры электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования,  
телефон (4932) 38-57-94,  
e-mail: kafedra@esde.ispu.ru

*Сулыненков Илья Николаевич,*

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
ассистент кафедры электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования,  
телефон (4932) 38-57-94,  
e-mail: sulynenkov@mail.ru

*Панков Дмитрий Леонидович,*

ОАО «МРСК Центра»,  
директор по эксплуатации и ремонтам,  
телефон (495) 747-30-18,  
e-mail: pankov\_dl@mrsk-1.ru

*Жулина Татьяна Александровна,*

ОАО «Контакт Т&D»,  
ведущий инженер-проектировщик,  
телефон (4932) 38-57-94,  
e-mail: kafedra@esde.ispu.ru