Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ОСНОВЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Методические указания к практическим занятиям

Благовещенск

Издательство АмГУ

2017

ББК 31.26 я 76
О75

Печатается по решению редакционно-издательского совета Амурского государственного университета

Разработаны в рамках реализации гранта «Подготовка высококвалифицированных кадров в сфере электроэнергетики и горно-металлургической отрасли для предприятий Амурской области» по заказу предприятия-партнера АО «Дальневосточная распределительная сетевая компания»

Рецензент:

А.Г. Палей, первый зам. генерального директора по инвестициям и развитию АО «Дальневосточная распределительная сетевая компания» (АО «ДРСК», г. Благовещенск).

О75 Основы эксплуатации электрооборудования: *методические* указания к практическим занятиям / А.Н. Козлов. – 2-е изд., испр. – Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2017. – 96 с.

Пособие представляет собой руководство к решению задач, курсовому проектированию и выполнению выпускной квалификационной работы для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров «Электроэнергетика и электротехника». Соответствует рабочей программе дисциплины «Эксплуатация электрооборудования» и федеральному государственному стандарту ВО РФ.

Рассмотрены вопросы эксплуатации силовых трансформаторов в различных режимах, устойчивости узла нагрузки и самозапуска электродвигателей и работа устройств АВР и АПВ.

В авторской редакции.

ББК 31.26 я 76
©Амурский государственный университет, 2017
©Козлов А.Н. (составитель), 2017

ПРЕДИСЛОВИЕ

Знание той или иной учебной дисциплины подразумевает умение применять полученные знания к решению конкретных вопросов практики. Такое умение не приходит само, а достигается тренировкой. Одной из эффективных форм тренировки является решение задач. В предлагаемых Вашему вниманию методических указаниях рассмотрены некоторые, сравнительно часто встречающиеся режимы работы силовых трансформаторов, а также схемы и методика расчета устройств автоматики и устойчивости узла нагрузки.

Дисциплина «Эксплуатация электрооборудования» введена в учебный план подготовки бакалавров по направлению «Электроэнергетика и электротехника» в Амурском государственном университете по согласованию с предприятиями, принимающими на работу выпускников энергетического факультета.

Цель дисциплины – формирование у будущих специалистов систематических знаний об особенностях ведения режимов и методах эксплуатации основного электрооборудования электрических станций и подстанций.

Основные задачи дисциплины – усвоение научных основ эксплуатации электрических станций и подстанций, выработка умений и навыков планирования и организации эксплуатации, умения и навыков анализировать существующий уровень эксплуатации электрооборудования станций и подстанций и намечать пути повышения качества эксплуатации.

Охватить многообразие возможных режимов работы электрооборудования и рекомендуемых в этих случаях эксплуатационных мероприятий невозможно ни в одной, ни в нескольких книгах. Цель настоящих методических указаний – научить студентов оценивать наиболее часто встречающиеся режимы работы силовых трансформаторов и электрических двигателей, производить необходимые расчеты и обосновывать предлагаемые решения и необходимые действия персонала на основании этих расчетов. А поскольку круг рассматриваемых задач сознательно ограничен, методические указания получили название «Основы эксплуатации электрооборудования».

Освоение данной дисциплины помогает студенту в приобретении следующих компетенций:

– готовности определять параметры оборудования объектов профессиональной деятельности (ПК-5);

– готовности обеспечивать требуемые режимы и заданные параметры технологического процесса по заданной методике (ПК-7);

– способности использовать технические средства для измерения и контроля основных параметров технологического процесса (ПК-8);

– способности составлять и оформлять типовую техническую документацию (ПК-9).

В результате освоения дисциплины студенты должны:

– **знать** основные организационные и технические требования при эксплуатации энергетических объектов предприятий электрических сетей (ПК-7, ПК-9); основные параметры, по которым производится мониторинг состояния оборудования (ПК-5, ПК-7); нормативные сроки текущих и капитальных ремонтов электрооборудования (ПК-9); современные технологии производства электромонтажных работ и последующей наладки электрооборудования (ПК-5, ПК-9);

– **получить умения** и навыки по испытаниям электрооборудования, предупреждению повреждений и отказов (ПК-5, ПК-8);

– **овладеть** навыками дискуссии по профессиональной тематике (ПК-9); навыками использования технических средств испытания и программ расчетов характеристик конструкционных материалов (ПК-8); информацией о технических параметрах оборудования для использования при диагностике (ПК-7, ПК-8); практическими вопросами организации ремонтов основного и вспомогательного электрооборудования, электрических аппаратов и проводников (ПК-9), навыками оценки уровня эксплуатации электрооборудования и формирования пути его совершенствования (ПК-7).

Знания, полученные при освоении дисциплины, могут быть востребованы при выполнении выпускной квалификационной работы.

Настоящее учебное пособие – очередная часть комплекта учебно-методических материалов, разрабатываемого кафедрой энергетики Амурского государственного университета в рамках реализации гранта Министерства образования и науки Российской Федерации «Подготовка высококвалифицированных кадров в сфере электроэнергетики и горно-металлургической отрасли для предприятий Амурской области» по заказу предприятия-партнера – АО «Дальневосточная распределительная сетевая компания» (АО «ДРСК»).

ВВЕДЕНИЕ

Правильный выбор параметров и режимов работы электрических аппаратов имеет большое значение для устойчивого функционирования электроэнергетических систем и систем электроснабжения.

Знание принципов выполнения и особенностей эксплуатации современного электрооборудования обязательно для выпускника энергетического факультета. Основные сведения о правилах эксплуатации содержатся в [2] и [3]. Материалы [3] обязательны для тепловых электростанций, работающих на органическом топливе, гидроэлектростанций, электрических и тепловых сетей Российской Федерации и для организаций, выполняющих работы применительно к этим объектам. Но, поскольку ведется постоянная работа по совершенствованию электрооборудования, появляется дополнительная информация в виде отдельных статей, обзоров и справочно-информационных материалов предприятий и фирм, выпускающих те или иные электрические аппараты и приборы.

В основу настоящего учебного пособия положены материалы [1], [2], [4] и [9], дополненные сведениями, появившимися в распоряжении составителей при поиске необходимой информации в сети «Интернет».

ПЕРЕЧЕНЬ ТЕМ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

Перечень тем	Часы	Осваиваемые компетенции
Определение допустимой величины и длительности систематической перегрузки трансформатора	2	ПК- 5, ПК- 7, ПК-8, ПК-9
Расчет токораспределения при параллельной работе трехобмоточных трансформаторов на двух обмотках при работе третьей обмотки на выделенную нагрузку	2	ПК- 5, ПК- 7, ПК-8, ПК-9
Нагрев силового трансформатора при нормальной работе	2	ПК- 5, ПК- 7, ПК-8, ПК-9
Нагрев силового трансформатора в режиме короткого замыкания	2	ПК- 5, ПК- 7, ПК-8, ПК-9
Расчет уравнительной мощности и загрузки при параллельной работе трансформаторов, отличающихся номинальными параметрами	2	ПК- 5, ПК- 7, ПК-8, ПК-9
Расчет потерь мощности и энергии в трехобмоточном трансформаторе	2	ПК- 5, ПК- 7, ПК-8, ПК-9
Оценка устойчивости узла нагрузки при потере связи с системой неограниченной мощности	2	ПК- 5, ПК- 7, ПК-8, ПК-9
Оценка возможности перерыва питания на шинах нагрузки по условиям самозапуска электродвигателя	2	ПК- 5, ПК- 7, ПК-8, ПК-9
Расчет самозапуска электродвигателя	2	ПК- 5, ПК- 7, ПК-8, ПК-9
Изучение схем устройств автоматики ввода резерва	2	ПК- 5, ПК- 7, ПК-8, ПК-9

КРИТЕРИИ ДОСТИЖЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО БЛОКУ ПРАКТИЧЕСКИХ ДИСЦИПЛИН

Балл	Критерии оценки (содержательная характеристика)
«1»	Работа выполнена полностью. Студент практически не владеет теоретическим материалом, допуская грубые ошибки, испытывает затруднения в формулировке собственных суждений, неспособен ответить на дополнительные вопросы.
«2»	Работа выполнена полностью. Студент не владеет теоретическим материалом, допуская ошибки по сущности рассматриваемых (обсуждаемых) вопросов, испытывает затруднения в формулировке собственных обоснованных и аргументированных суждений, допускает ошибки при ответе на дополнительные вопросы.
«3»	Работа выполнена полностью. Студент владеет теоретическим материалом на минимально допустимом уровне, отсутствуют ошибки при описании теории, испытывает затруднения в формулировке собственных обоснованных и аргументированных суждений, допуская незначительные ошибки на дополнительные вопросы.
«4»	Работа выполнена полностью. Студент владеет теоретическим материалом, отсутствуют ошибки при описании теории, формулирует собственные, самостоятельные, обоснованные, аргументированные суждения, допуская незначительные ошибки на дополнительные вопросы.
«5»	Работа выполнена полностью. Студент владеет теоретическим материалом, отсутствуют ошибки при описании теории, формулирует собственные, самостоятельные, обоснованные, аргументированные суждения, представляет полные и развернутые ответы на дополнительные вопросы.

Работа, оцененная менее, чем 3 баллами, НЕ МОЖЕТ БЫТЬ «ЗАЧТЕНА» и пересдается.

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМОЙ ВЕЛИЧИНЫ И ДЛИТЕЛЬНОСТИ СИСТЕМАТИЧЕСКОЙ ПЕРЕГРУЗКИ ТРАНСФОРМАТОРА [1]

Цель практического занятия: Все трансформаторы допускают длительное превышение номинального тока любой обмотки на 5% при напряжении не выше номинального. Но в ряде случаев такой безоговорочно допустимой перегрузки на 5% оказывается недостаточно и приходится рассчитывать, какую перегрузку можно допустить безболезненно для изоляции трансформатора, т. е. без укорочения срока его службы. Величина допустимых систематических, т.е. повторяющихся систематически в течение определенного периода перегрузок, зависит от суточного графика нагрузки, температуры охлаждающей среды и конструкции трансформатора.

Цель занятия – на практических примерах освоить преобразование фактического суточного графика нагрузки в упрощенный двухступенчатый прямоугольный график, эквивалентный фактическому по выделению тепла в трансформаторе и методику расчета допустимой величины и длительности систематической перегрузки силового трансформатора.

Порядок проведения практического занятия: В аудитории выполняется разбор теоретической части занятия и примера расчета. При работе над задачей, предназначенной для самостоятельного решения, может потребоваться дополнительная информация, за которой следует обратиться к [2].

Теоретическая часть. В общем случае температурный режим трансформатора а, следовательно, и его допустимая нагрузка зависят от постоянной времени нагрева трансформатора, от графика нагрузки, от температуры охлаждающей среды. Постоянная времени нагрева в свою очередь связана с типом охлаждения трансформатора.

Методика расчета допустимых систематических нагрузок изложена в [2]. На рис. 1.1 приведены в графической форме значения допустимых величин систематических нагрузок трансформаторов, соответствующих системам охлаждения М и Д, и значениям θ (эквивалентной температуры охлаждающей среды) 0°С и –10°С. Цифры около кривых показывают допустимую продолжительность максимума в часах, а пунктиром нанесены участки графиков, относящиеся к значениям нагрузки, превышающим 150% от номинальной (эти значения допустимы только с особого разрешения завода-изготовителя) [1].

При использовании графиков нагрузочной способности необходимо предварительно фактический многоступенчатый график нагрузки

преобразовать в эквивалентный по тепловому режиму трансформатора двухступенчатый график, характеризуемый двумя коэффициентами: начальной нагрузки K_1 и максимальной нагрузки K_2.

Коэффициентом начальной нагрузки называется отношение эквивалентной начальной нагрузки $I_{э.н}$ к номинальной $I_н$:

$$K_1 = I_{э.н} / I_н . \qquad (1.1)$$

Коэффициент максимальной нагрузки – это отношение эквивалентной максимальной нагрузки $I_{э.м}$ к номинальной:

$$K_2 = I_{э.м} / I_н . \qquad (1.2)$$

Эквивалентные нагрузки $I_{э.н}$ и $I_{э.м}$ определяются из выражения:

$$I_э = I_н \cdot \sqrt{\frac{\sum_i K_i^2 \cdot t_i^2}{\sum_i t_i}} , \qquad (1.3)$$

где K_i – нагрузка на *i-м* интервале времени, выраженная в долях номинальной нагрузки трансформатора $I_н$; t_i – длительность *i-го* интервала.

При расчете величины $I_{э.м}$ суммированием должны быть охвачены те интервалы t_i, которым соответствуют значения

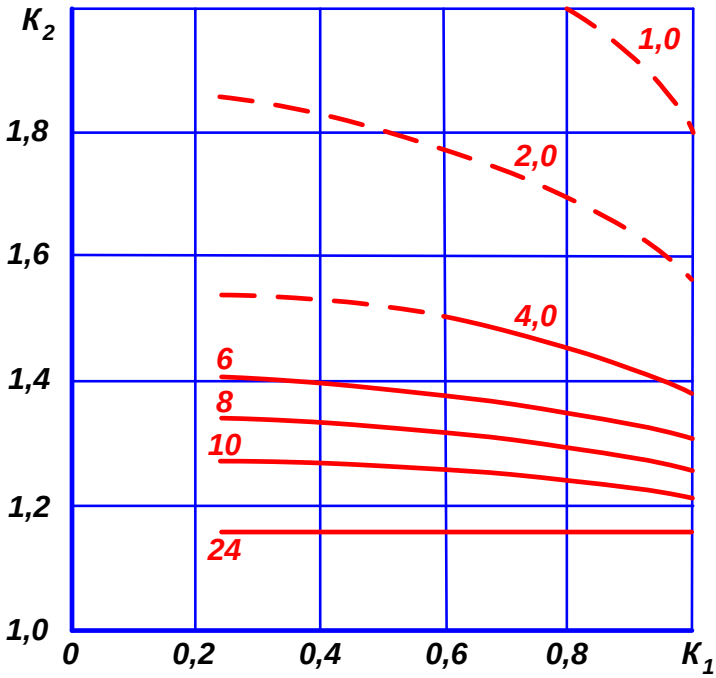
$$K_i > 1. \qquad (1.4)$$

Остальные интервалы времени и соответствующие им значения K_i используются для определения $I_{э.н}$. Полученная по выражению (1.3) величина $I_{э.м}$ проверяется по критерию: $I_{э.м} \geq 0,9 \cdot I_м$, где $I_м$ – наибольшая нагрузка по заданному графику работы трансформатора [1]. В соответствии с [2] $I_м = 1,4 \cdot I_н$; следовательно

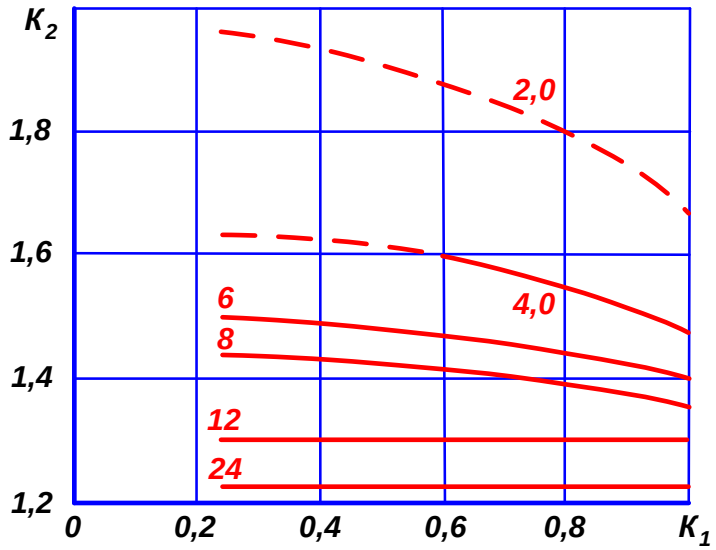
$$I_{э.м} \geq 0,9 \cdot 1,4 \cdot I_н = 1,26 \cdot I_н . \qquad (1.5)$$

Если соотношение (1.5) не соблюдается, то в качестве эквивалентной максимальной нагрузки для подстановки в (1.2) принимается значение

$$I'_{э.м} \geq 0,9 \cdot I_м . \qquad (1.6)$$



а)



б)

Рис. 1.1. Допустимые величины систематических нагрузок трансформаторов, соответствующих системам охлаждения М и Д, и значениям эквивалентной температуры охлаждающей среды θ: 0°С (а) и –10°С (б) [1].

В этом случае расчетная длительность максимума принимается равной

$$t'_м = \frac{\left(I'_{э.м}\right)^2 \cdot t_м}{0{,}81 \cdot I_м^2}, \qquad (1.7)$$

где $t_м$ – фактическая длительность периода, для которого справедливо соотношение (1.4).

Располагая графиками нагрузочной способности и используя график, соответствующий системе охлаждения, а также эквивалентной температуре охлаждающей среды $\theta_{охл}$, можно по известным значениям двух характеристических параметров (K_1, K_2, $t_м$) определить допустимое значение третьего параметра. Например, по рассчитанным величинам K_1 и K_2 определить на графике, соответствующем заданной величине $\theta_{охл}$ допустимое значение $t_{м.доп}$ и сравнить его с величиной $t_м$, равной

$$t_м = t_1 + t_2, \tag{1.8}$$

где t_1, t_2 – интервалы времени, в течение которых максимальная нагрузка превышает номинальную и справедливо соотношение (1.4).

Расчет превышений температуры в перегруженном трансформаторе можно провести с помощью графиков. На рис. 1.2 приведен <u>упрощенный</u> вариант графика из [2].

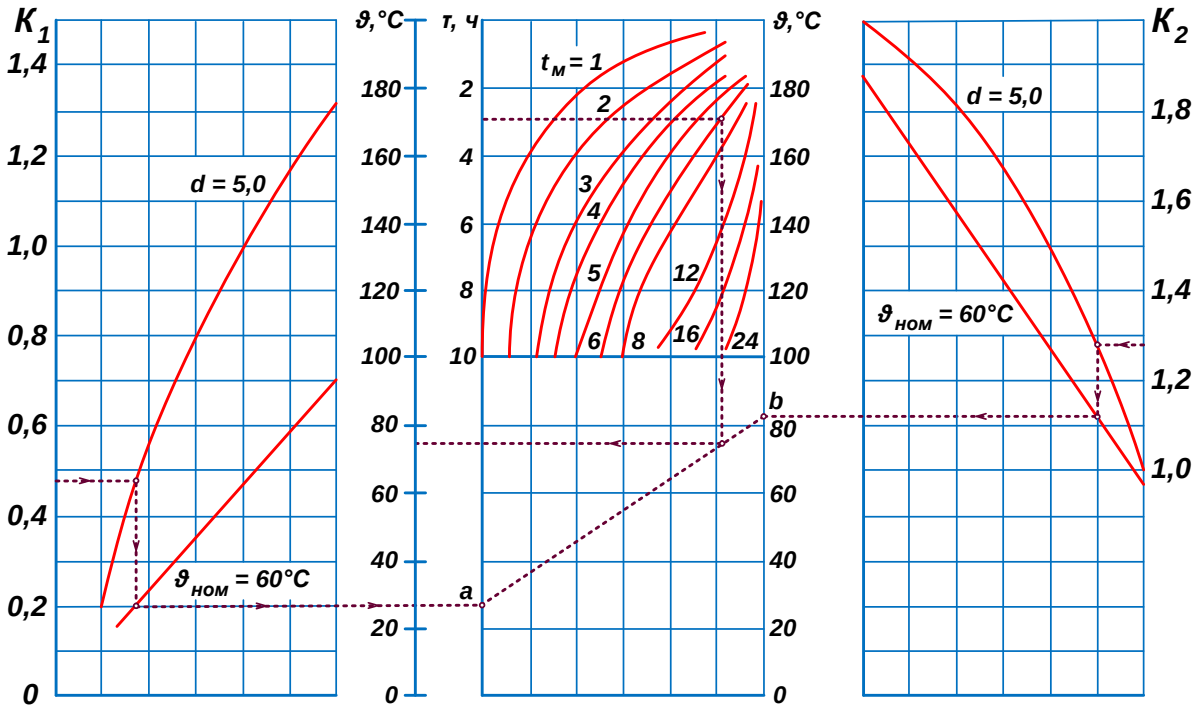


Рис. 1.2. К определению величины $\vartheta_м$ [1]

Указанный график позволяет определить превышение температуры верхних слоев масла над температурой окружающей среды $\vartheta_м$, располагая такими параметрами, как K_1, K_2, $t_м$, τ, величиной допустимого превышения температуры масла в верхних слоях над температурой окружающей среды

$\vartheta_{м.ном}$ и отношением d величины потерь короткого замыкания $P_{к.з.}$ к потерям холостого хода $P_{х.х.}$ трансформатора.

В соответствии с [2]:

– для масляных трансформаторов, герметизированных, или с расширителем $\vartheta_{м.ном} = 60°C$;

– для трансформаторов с охлаждением М и Д $\tau = 3ч$;

– для трансформаторов с охлаждением 110 кВ в первом приближении можно принять

$$d = \frac{P_{к.з.}}{P_{х.х.}} \approx 5,0.$$

В качестве примера на рис. 2 пунктиром показан порядок определения величины $\vartheta_м$ для следующих характеристических параметров:

$$K_1 = 0,48; \quad K_2 = 1,26; \quad t_м = 6ч.$$

Из точки $K_1 = 0,48$ левого графика (рис. 1.2) проводим горизонтальную линию до пересечения с линией $d = 5,0$; затем из точки пересечения опускаем вертикальную линию до пересечения с линией $\vartheta_{м.ном} = 60°C$. Из полученной точки проводим горизонтальную линию до пересечения с левой вертикальной границей среднего графика в точке « *a* ». Аналогичное построение выполняем на правом графике: от шкалы K_2 (точка $K_2 = 1,26$) до точки « *b* » на правой вертикальной границе среднего графика. Полученные точки « *a* » и « *b* » соединяем прямой линией. Затем из точки $\tau = 3ч$ (верхняя часть левой шкалы среднего графика) проводим горизонтальную линию до пересечения с линией продолжительности перегрузки $t_м = 6ч$; из точки их пересечения опускаем вертикаль на линию «*a* - *b*» и из новой точки пересечения проводим горизонтальную линию к левой выделенной шкале среднего графика, по которой и определяем искомое значение превышения температуры:

$$\vartheta_м = 75°C.$$

Максимальную температуру верхних слоев масла $\theta_м$ определяем по формуле:

$$\theta_м = \theta_{охл} + \vartheta_м. \tag{1.9}$$

Температура наиболее нагретой точки силового трансформатора:

$$\theta_{ннт.м} = \theta_м + \vartheta_{ннт.м}, \tag{1.10}$$

где $\vartheta_{ннт.м}$ – превышение температуры наиболее нагретой точки над температурой верхних слоев масла.

<u>Пример 1.1.</u> Трансформатор с системой охлаждения Д установлен в местности с эквивалентной температурой окружающей среды (для зимы) $\theta_{охл} = -10°C$. Нагрузка трансформатора в зимние сутки составляет 140% в течение времени $t_1 = 3ч$; затем в течение времени $t_2 = 3ч$ держится на уровне 110%; на протяжении $t_3 = 8ч$ – на уровне 60% и остальное время – на уровне 40% номинальной.

Необходимо определить:

– допустимую продолжительность эквивалентной максимальной нагрузки и сравнить ее с заданной продолжительностью максимума;

– максимальную температуру верхних слоев масла и наиболее нагретой точки обмотки.

При этом номинальное значение превышения температуры наиболее нагретой точки над температурой верхних слоев масла принять 20°С.

<u>Решение</u>. 1. По формуле (1.3) определяем значения эквивалентных нагрузок двухступенчатого графика:

$$I_{э.м} = I_н \cdot \sqrt{\frac{1,4^2 \cdot 3 + 1,1^2 \cdot 3}{3+3}} = I_н \cdot \sqrt{\frac{1,96 \cdot 3 + 1,21 \cdot 3}{3+3}} = 1,26 \cdot I_н;$$

$$I_{э.н} = I_н \cdot \sqrt{\frac{0,6^2 \cdot 8 + 0,4^2 \cdot (24-3-3-8)}{24-3-3}} = 0,482 \cdot I_н.$$

Проверка по (1.5) показывает, что величину $I_{э.м}$ не требует пересчета по формуле (1.6).

В соответствии с (1.1) и (1.2) значения коэффициентов эквивалентных нагрузок:

$$K_1 = \frac{I_{э.н}}{I_н} = 0,482;$$

$$K_2 = \frac{I_{э.м}}{I_н} = 1,26.$$

Фактическая продолжительность максимума, согласно (1.8), составляет

$$t_м = t_1 + t_2 = 3 + 3 = 6ч.$$

Определим допустимую величину $t_{м.доп}$, соответствующую полученным выше коэффициентам эквивалентных нагрузок – рис. 1.3.

Из построений на рис. 1.3 имеем $t_{м.доп} = (18 \div 20)ч$, что в три раза превышает фактическую продолжительность максимума. Следовательно, ***заданный условиями задачи режим перегрузки допустим***.

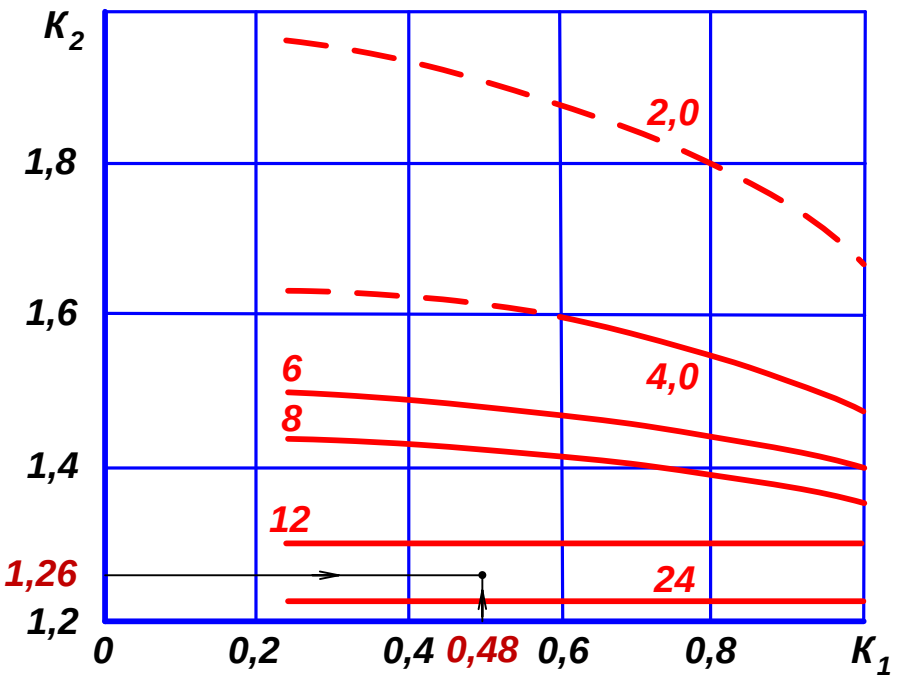


Рис. 1.3. Определение $t_{м.доп}$ *по известным* K_1 *и* K_2.

По графику (рис. 1.2) определяем величину превышения температуры верхних слоев масла над температурой окружающей среды, исходя из следующих данных:

$$\vartheta_{м.ном} = 60°C; \quad \tau = 3ч; \quad d = 5,0.$$

Последовательность действий подробно изложена выше. Получаем

$$\vartheta_м = 75°C.$$

Температура верхних слоев масла $\theta_м$:

$$\theta_м = \theta_{охл} + \vartheta_м = -10 + 75 = 65°C.$$

Температура наиболее нагретой точки силового трансформатора:

$$\theta_{ннт.м} = \theta_м + \vartheta_{ннт.м} = 65 + 20 = 85°C.$$

Полученные значения $\theta_м$ и $\theta_{ннт.м}$ меньше предельно допустимых для режима систематических перегрузок величин [2, 3]:

$$\theta_{м.макс.доп.} = 95°C;$$

$$\theta_{ннт.макс.доп} = 140°C.$$

Полученные результаты подтверждают сделанный выше вывод о допустимости рассмотренного режима перегрузки трансформатора.

Задачи для самостоятельного решения (вариант задается преподавателем):

Вариант	Задание
1.1	Трансформатор с системой охлаждения Д установлен в местности с эквивалентной температурой окружающей среды (для зимы) $\theta_{охл} = 0°C$. Нагрузка трансформатора в зимние сутки составляет 135% в течение времени $t_1 = 2ч$; в течение времени $t_2 = 4ч$ держится на уровне 120%; на протяжении $t_3 = 4ч$ – на уровне 105%; затем, в течение времени $t_4 = 6ч$ – на уровне 70% и остальное время – на уровне 50% номинальной. ***Необходимо определить***: – допустимую продолжительность эквивалентной максимальной нагрузки и сравнить ее с заданной продолжительностью максимума; – максимальную температуру верхних слоев масла и наиболее нагретой точки обмотки. При этом номинальное значение превышения температуры наиболее нагретой точки над температурой верхних слоев масла принять 25°С.
1.2	Трансформатор с системой охлаждения М установлен в местности с эквивалентной температурой окружающей среды (для зимы) $\theta_{охл} = -10°C$. Нагрузка трансформатора в зимние сутки составляет 120% в течение времени $t_1 = 2ч$; в течение времени $t_2 = 4ч$ держится на уровне 110%; на протяжении $t_3 = 4ч$ – на уровне 100%; затем, в течение времени $t_4 = 6ч$ – на уровне 60% и остальное время – на уровне 40% номинальной. ***Необходимо определить***: – допустимую продолжительность эквивалентной максимальной нагрузки и сравнить ее с заданной продолжительностью максимума; – максимальную температуру верхних слоев масла и наиболее нагретой точки обмотки. При этом номинальное значение превышения температуры наиболее нагретой точки над температурой верхних слоев масла принять 20°С.
1.3	Трансформатор с системой охлаждения М установлен в местности с эквивалентной температурой окружающей среды (для зимы) $\theta_{охл} = 0°C$. Нагрузка трансформатора в зимние сутки составляет 135% в течение времени $t_1 = 2ч$; в течение времени $t_2 = 4ч$ держится на уровне 120%; на протяжении $t_3 = 4ч$ – на уровне 105%; затем, в течение времени $t_4 = 6ч$ – на уровне 70% и остальное время – на уровне 50% номинальной. ***Необходимо определить***: – допустимую продолжительность эквивалентной максимальной нагрузки и сравнить ее с заданной продолжительностью максимума; – максимальную температуру верхних слоев масла и наиболее нагретой точки обмотки. При этом номинальное значение превышения температуры наиболее нагретой точки над температурой верхних слоев масла принять 20°С.

1.4	Трансформатор с системой охлаждения Д установлен в местности с эквивалентной температурой окружающей среды (для зимы) $\theta_{охл} = -10°C$. Нагрузка трансформатора в зимние сутки составляет 140% в течение времени $t_1 = 3ч$; в течение времени $t_2 = 3ч$ держится на уровне 125%; на протяжении $t_3 = 4ч$ – на уровне 105%; затем, в течение времени $t_4 = 6ч$ – на уровне 60% и остальное время – на уровне 40% номинальной. ***Необходимо определить***: – допустимую продолжительность эквивалентной максимальной нагрузки и сравнить ее с заданной продолжительностью максимума; – максимальную температуру верхних слоев масла и наиболее нагретой точки обмотки. При этом номинальное значение превышения температуры наиболее нагретой точки над температурой верхних слоев масла принять 15°С.
1.5	Трансформатор с системой охлаждения Д установлен в местности с эквивалентной температурой окружающей среды (для зимы) $\theta_{охл} = 0°C$. Нагрузка трансформатора в зимние сутки составляет 130% в течение времени $t_1 = 4ч$; в течение времени $t_2 = 4ч$ держится на уровне 120%; на протяжении $t_3 = 4ч$ – на уровне 110%; затем, в течение времени $t_4 = 6ч$ – на уровне 50% и остальное время – на уровне 40% номинальной. ***Необходимо определить***: – допустимую продолжительность эквивалентной максимальной нагрузки и сравнить ее с заданной продолжительностью максимума; – максимальную температуру верхних слоев масла и наиболее нагретой точки обмотки. При этом номинальное значение превышения температуры наиболее нагретой точки над температурой верхних слоев масла принять 20°С.

Требования к отчету: отчет должен содержать решенную задачу. При сдаче зачета необходимо уметь давать пояснения по существу выполненного задания, а также показать знание предмета в объеме программы.

Контрольные вопросы:

1. *Допускается ли перегрузка трансформаторов и автотрансформаторов?*
2. *В чем отличие аварийной и систематической перегрузки?*
3. *Что такое «тепловое старение изоляции трансформаторов»?*
4. *Поясните термины «температура наиболее нагретой точки трансформатора» и «температура верхних слоев масла».*
5. *Что такое «превышение температуры»?*

2. РАСЧЕТ ТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ ТРЕХОБМОТОЧНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА ДВУХ ОБМОТКАХ ПРИ РАБОТЕ ТРЕТЬЕЙ ОБМОТКИ НА ВЫДЕЛЕННУЮ НАГРУЗКУ [1]

Цель практического занятия: Условия работы электрооборудования, либо требования, предъявляемые к схемам электроснабжения спецификой режимов работы потребителей, порой обуславливают работу трехобмоточных трансформаторов на подстанциях в режиме, когда на одном напряжении обмотки двух трансформаторов работают параллельно, а на другом – раздельно, при отключенном секционном выключателе. В результате нагрузка распределяется между трансформаторами неодинаково.

Цель занятия – на практических примерах освоить расчет распределения нагрузки между обмотками разного напряжения трехобмоточных трансформаторов двухтрансформаторной подстанции в режиме отключения секционного выключателя на одной из ступеней напряжения на стороне потребителей и оценку допустимости такого режима.

Порядок проведения практического занятия: В аудитории выполняется разбор теоретической части занятия и примера расчета. При работе над задачей, предназначенной для самостоятельного решения, может потребоваться дополнительная информация, за которой следует обратиться к [1, 2].

Теоретическая часть. Раздельная работа трехобмоточных трансформаторов на стороне низшего напряжения обусловлена необходимостью ограничения токов КЗ. На стороне среднего напряжения (где не требуется ограничения токов) обмотки трансформаторов могут работать параллельно в целях повышения надежности и выравнивания загрузки трансформаторов – рис. 2.1.

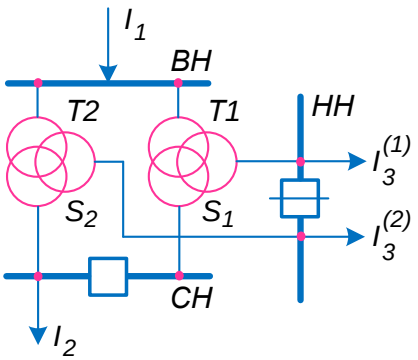


Рис. 2.1. Принципиальная схема подстанции при раздельной работе на стороне НН [1].

Решение задачи необходимо начинать с составления схемы замещение подстанции. Каждый трансформатор представляется в виде упрощенной трехлучевой схемы замещения, в которой вместо относительных величин сопротивления проставлены равные им численные значения относительных величин напряжения КЗ (рис. 2.2) [1].

Напряжения КЗ отдельных лучей схемы замещения трансформатора определяются по заданным величинам напряжения КЗ между обмотками из выражений (индекс трансформатора опущен):

$$\begin{aligned} U_1 &= 0,5 \cdot \left(U_{12} + U_{13} - U_{23}\right) \\ U_2 &= 0,5 \cdot \left(U_{12} + U_{23} - U_{13}\right) \\ U_3 &= 0,5 \cdot \left(U_{13} + U_{23} - U_{12}\right) \end{aligned} \qquad (2.1)$$

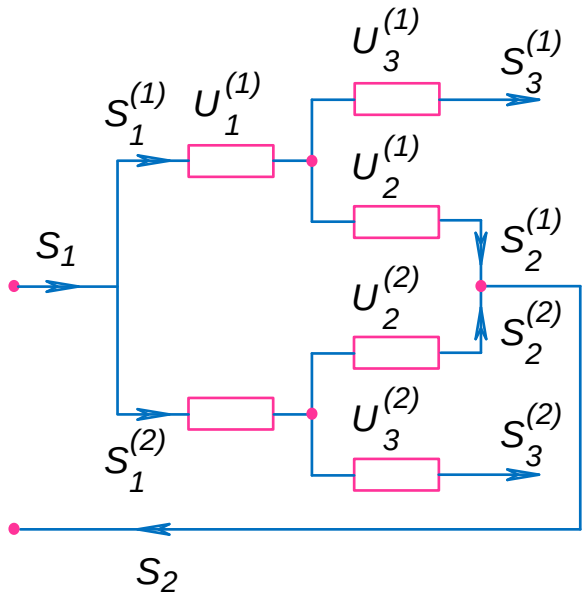


Рис. 2.2. Схема замещения подстанции при раздельной работе на стороне НН [1]

Поскольку напряжения КЗ приведены к номинальной мощности соответствующего трансформатора, перед расчетами их следует привести к единой базовой мощности $S_б$, в качестве которой рекомендуется принять наименьшую из мощностей обмоток трансформаторов, по формуле:

$$U_{прив.} = U \cdot \frac{S_б}{S_н} \qquad (2.2)$$

где $S_н$ – номинальная мощность соответствующего трансформатора.

Используя законы Кирхгофа, получаем следующую систему уравнений для четырех узлов и одного замкнутого контура рассматриваемой эквивалентной схемы (рис. 2.2) [1]:

$$S_2 = S_2^{(1)} + S_2^{(2)}$$
$$S_1 = S_1^{(1)} + S_1^{(2)}$$
$$S_1^{(1)} = S_2^{(1)} + S_3^{(1)} \qquad (2.3)$$
$$S_1^{(2)} = S_2^{(2)} + S_3^{(2)}$$
$$S_1^{(1)} \cdot U_1^{(1)} + S_2^{(1)} \cdot U_2^{(1)} = S_1^{(2)} \cdot U_1^{(2)} + S_2^{(2)} \cdot U_2^{(2)}$$

Из этой системы уравнений находим следующие формулы для искомых значений нагрузки работающих параллельно обмоток среднего напряжения трансформаторов

$$S_2^{(1)} = \frac{S_2 \cdot U_{12}^{(2)} + S_3^{(2)} \cdot U_1^{(2)} - S_3^{(1)} \cdot U_1^{(1)}}{U_{12}^{(1)} + U_{12}^{(2)}}$$

$$(2.4)$$

$$S_2^{(2)} = \frac{S_2 \cdot U_{12}^{(1)} + S_3^{(1)} \cdot U_1^{(1)} - S_3^{(2)} \cdot U_1^{(2)}}{U_{12}^{(1)} + U_{12}^{(2)}}$$

Полученные значения $S_2^{(1)}$ и $S_2^{(2)}$ подставляем в (2.3) и определяем соответствующие значения $S_1^{(1)}$ и $S_1^{(2)}$, то есть загрузку обмоток высшего напряжения трансформаторов. Заключительным этапом решения задачи является сравнение полученных фактических нагрузок обмоток трансформаторов с заданными номинальными мощностями этих обмоток.

<u>Пример 2.1.</u> Суммарная нагрузка работающих параллельно обмоток среднего напряжения $S_2 = 8$ МВА.

Нагрузка работающих раздельно обмоток низшего напряжения трансформаторов 1 и 2, соответственно: $S_3^{(1)} = 5$ МВА, $S_3^{(2)} = 8$ МВА.

Характеристики трансформаторов приведены в таблице:

Трансформатор	Мощность, МВА	Мощность обмоток, %			Напряжение короткого замыкания, %		
T1	$S^{(1)}$	ВН	СН	НН	$U_{12}^{(1)}$	$U_{13}^{(1)}$	$U_{23}^{(1)}$
	20	**100**	**100**	**100**	**10,5**	**17**	**6**
T2	$S^{(2)}$	ВН	СН	НН	$U_{12}^{(2)}$	$U_{13}^{(2)}$	$U_{23}^{(2)}$
	20	**100**	**67**	**67**	**10,5**	**6**	**17**

Номинальные напряжения обмоток трансформаторов одинаковы.

Необходимо определить:

Нагрузки на стороне среднего и высшего напряжения каждого из трансформаторов и сравнить их с номинальными мощностями обмоток трансформаторов. Активные сопротивления и потери не учитывать.

Решение: В качестве базисной мощности принимается мощность обмоток среднего и низшего напряжения второго трансформатора $S_{СН}^{(2)}$ и $S_{НН}^{(2)}$ соответственно:

$$S_б = S_{СН}^{(2)} = S_{НН}^{(2)} = S^{(2)} \cdot 0,67 = 20 \cdot 0,67 = 13,4 \text{ МВА}$$

В соответствии с (2.2) определяются приведенные значения напряжений КЗ

$$U_{12прив.}^{(1)} = U_{12}^{(1)} \cdot \frac{S_б}{S^{(1)}} = 10,5 \cdot \frac{13,4}{20} = 9,1 \text{ \%}$$

$$U_{13прив.}^{(1)} = U_{13}^{(1)} \cdot \frac{S_б}{S^{(1)}} = 17 \cdot \frac{13,4}{20} = 11,6 \text{ \%}$$

$$U_{23прив.}^{(1)} = U_{23}^{(1)} \cdot \frac{S_б}{S^{(1)}} = 6 \cdot \frac{13,4}{20} = 4,0 \text{ \%}$$

$$U_{12прив.}^{(2)} = U_{12}^{(2)} \cdot \frac{S_б}{S^{(2)}} = 10,5 \cdot \frac{13,4}{20} = 9,1 \text{ \%}$$

$$U_{13прив.}^{(2)} = U_{13}^{(2)} \cdot \frac{S_б}{S^{(2)}} = 6 \cdot \frac{13,4}{20} = 4,0 \text{ \%}$$

$$U_{23прив.}^{(2)} = U_{23}^{(2)} \cdot \frac{S_б}{S^{(2)}} = 17 \cdot \frac{13,4}{20} = 11,6 \text{ \%}$$

Далее по тексту индексы «прив» опускаются. Используя выражение (2.1), определяем

$$U_1^{(1)} = 0,5 \cdot \left(U_{12}^{(1)} + U_{13}^{(1)} - U_{23}^{(1)}\right) = 0,5 \cdot \left(9,1 + 11,6 - 4,0\right) = 8,4 \text{ \%}$$

$$U_2^{(1)} = 0,5 \cdot \left(U_{12}^{(1)} + U_{23}^{(1)} - U_{13}^{(1)}\right) = 0,5 \cdot \left(9,1 + 4,0 - 11,6\right) = 0,8 \text{ \%}$$

$$U_3^{(1)} = 0,5 \cdot \left(U_{13}^{(1)} + U_{23}^{(1)} - U_{12}^{(1)}\right) = 0,5 \cdot \left(11,6 + 4,0 - 9,1\right) = 3,3 \text{ \%}$$

$$U_1^{(2)} = 0,5 \cdot \left(U_{12}^{(2)} + U_{13}^{(2)} - U_{23}^{(2)}\right) = 0,5 \cdot \left(9,1 + 4,0 - 11,6\right) = 0,8 \text{ \%}$$

$$U_2^{(2)} = 0,5 \cdot \left(U_{12}^{(2)} + U_{13}^{(2)} - U_{23}^{(2)}\right) = 0,5 \cdot \left(9,1 + 11,6 - 4,0\right) = 8,4 \text{ \%}$$

$$U_3^{(2)} = 0,5 \cdot \left(U_{12}^{(2)} + U_{13}^{(2)} - U_{23}^{(2)}\right) = 0,5 \cdot \left(4,0 + 11,6 - 9,1\right) = 3,3 \text{ \%}$$

По (2.4) можно определить нагрузки обмоток среднего напряжения трансформаторов:

$$S_2^{(1)} = \frac{S_2 \cdot U_{12}^{(2)} + S_3^{(2)} \cdot U_1^{(2)} - S_3^{(1)} \cdot U_1^{(1)}}{U_{12}^{(1)} + U_{12}^{(2)}} = \frac{8 \cdot 9,1 + 8 \cdot 0,8 - 5 \cdot 8,4}{9,1 + 9,1} =$$

$$= \frac{72,8 + 6,4 - 42}{18,2} = 2,0 \text{ МВА;}$$

$$S_2^{(2)} = \frac{S_2 \cdot U_{12}^{(1)} + S_3^{(1)} \cdot U_1^{(1)} - S_3^{(2)} \cdot U_1^{(2)}}{U_{12}^{(1)} + U_{12}^{(2)}} = \frac{8 \cdot 9{,}1 + 5 \cdot 8{,}4 - 8 \cdot 0{,}8}{9{,}1 + 9{,}1} =$$

$$= \frac{72{,}8 + 42 - 6{,}4}{18{,}2} = 6{,}0 \text{ МВА};$$

По (2.3) нагрузка обмоток высшего напряжения трансформаторов составляет:

$$S_1^{(1)} = S_2^{(1)} + S_3^{(1)} = 2{,}0 + 5{,}0 = 7{,}0 \text{ МВА};$$

$$S_1^{(2)} = S_2^{(2)} + S_3^{(2)} = 6{,}0 + 8{,}0 = 14{,}0 \text{ МВА}.$$

Относительная загрузка обмоток трансформатора (в долях номинальной мощности соответствующей обмотки) составляет:

- для первого трансформатора:

$$\frac{S_1^{(1)}}{S^{(1)}} = \frac{7{,}0}{20{,}0} = 0{,}35; \quad \frac{S_2^{(1)}}{S_{CH}^{(1)}} = \frac{2{,}0}{20{,}0} = 0{,}10; \quad \frac{S_3^{(1)}}{S_{HH}^{(1)}} = \frac{5{,}0}{20{,}0} = 0{,}25;$$

- для второго трансформатора:

$$\frac{S_1^{(2)}}{S^{(2)}} = \frac{14{,}0}{20{,}0} = 0{,}70; \quad \frac{S_2^{(2)}}{S_{CH}^{(2)}} = \frac{6{,}0}{13{,}4} = 0{,}45; \quad \frac{S_3^{(2)}}{S_{HH}^{(2)}} = \frac{8{,}0}{13{,}4} = 0{,}60.$$

Таким образом ни одна обмотка трансформаторов не загружается выше номинала.

Задачи для самостоятельного решения (вариант задается преподавателем)

<table>
<tr><th>Вариант</th><th>Задание</th></tr>
<tr><td>2.1</td><td>
Суммарная нагрузка работающих параллельно обмоток среднего напряжения $S_2 = 6$ МВА.
Нагрузка работающих раздельно обмоток низшего напряжения трансформаторов 1 и 2, соответственно: $S_3^{(1)} = 4$ МВА, $S_3^{(2)} = 6$ МВА.
Характеристики трансформаторов приведены в таблице:
<table>
<tr><th rowspan="2">Трансформатор</th><th rowspan="2">Мощность, МВА</th><th colspan="3">Мощность обмоток, %</th><th colspan="3">Напряжение короткого замыкания, %</th></tr>
<tr><td>$S^{(1)}$</td><td>ВН</td><td>СН</td><td>НН</td><td>$U_{12}^{(1)}$</td><td>$U_{13}^{(1)}$</td><td>$U_{23}^{(1)}$</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Т1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td></td><td>16</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>10,5</td><td>17</td><td>6</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Т2</td><td>$S^{(2)}$</td><td>ВН</td><td>СН</td><td>НН</td><td>$U_{12}^{(2)}$</td><td>$U_{13}^{(2)}$</td><td>$U_{23}^{(2)}$</td></tr>
<tr><td></td><td>16</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>10,5</td><td>17</td><td>6</td></tr>
</table>
Номинальные напряжения обмоток трансформаторов одинаковы.
Необходимо определить:
Нагрузки на стороне среднего и высшего напряжения каждого из трансформаторов и сравнить их с номинальными мощностями обмоток трансформаторов. Активные сопротивления и потери не учитывать.
</td></tr>
</table>

<table>
<tr><td>2.2</td><td>
Суммарная нагрузка работающих параллельно обмоток среднего напряжения $S_2 = 12$ МВА.
Нагрузка работающих раздельно обмоток низшего напряжения трансформаторов 1 и 2, соответственно: $S_3^{(1)} = 7$ МВА, $S_3^{(2)} = 6$ МВА.
Характеристики трансформаторов приведены в таблице:
<table>
<tr><td rowspan="2">Трансформатор</td><td>Мощность, МВА</td><td colspan="3">Мощность обмоток, %</td><td colspan="3">Напряжение короткого замыкания, %</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Т1</td><td>$S^{(1)}$</td><td>ВН</td><td>СН</td><td>НН</td><td>$U_{12}^{(1)}$</td><td>$U_{13}^{(1)}$</td><td>$U_{23}^{(1)}$</td></tr>
<tr><td></td><td>25</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>10,5</td><td>17,5</td><td>6,5</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Т2</td><td>$S^{(2)}$</td><td>ВН</td><td>СН</td><td>НН</td><td>$U_{12}^{(2)}$</td><td>$U_{13}^{(2)}$</td><td>$U_{23}^{(2)}$</td></tr>
<tr><td></td><td>25</td><td>100</td><td>67</td><td>67</td><td>10,5</td><td>17,5</td><td>6,5</td></tr>
</table>
Номинальные напряжения обмоток трансформаторов одинаковы.
Необходимо определить:
Нагрузки на стороне среднего и высшего напряжения каждого из трансформаторов и сравнить их с номинальными мощностями обмоток трансформаторов. Активные сопротивления и потери не учитывать.
</td></tr>
<tr><td>2.3</td><td>
Суммарная нагрузка работающих параллельно обмоток среднего напряжения $S_2 = 18$ МВА.
Нагрузка работающих раздельно обмоток низшего напряжения трансформаторов 1 и 2, соответственно: $S_3^{(1)} = 12$ МВА, $S_3^{(2)} = 10$ МВА.
Характеристики трансформаторов приведены в таблице:
<table>
<tr><td rowspan="2">Трансформа ор</td><td>Мощность, МВА</td><td colspan="3">Мощность обмоток, %</td><td colspan="3">Напряжение короткого замыкания, %</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Т1</td><td>$S^{(1)}$</td><td>ВН</td><td>СН</td><td>НН</td><td>$U_{12}^{(1)}$</td><td>$U_{13}^{(1)}$</td><td>$U_{23}^{(1)}$</td></tr>
<tr><td></td><td>40</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>10,5</td><td>17</td><td>6</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Т2</td><td>$S^{(2)}$</td><td>ВН</td><td>СН</td><td>НН</td><td>$U_{12}^{(2)}$</td><td>$U_{13}^{(2)}$</td><td>$U_{23}^{(2)}$</td></tr>
<tr><td></td><td>40</td><td>100</td><td>100</td><td>100</td><td>17</td><td>10,5</td><td>6</td></tr>
</table>
Номинальные напряжения обмоток трансформаторов одинаковы.
Необходимо определить:
Нагрузки на стороне среднего и высшего напряжения каждого из трансформаторов и сравнить их с номинальными мощностями обмоток трансформаторов. Активные сопротивления и потери не учитывать.
</td></tr>
</table>

:

Требования к отчету: отчет должен содержать решенную задачу. При сдаче зачета необходимо уметь давать пояснения по существу выполненного задания, а также показать знание предмета в объеме программы.

Контрольные вопросы:

1. *По какой причине может потребоваться раздельная работа обмоток двух трансформаторов на одном из напряжений на стороне потребителей?*
2. *Как проверить допустимость загрузки каждой из обмоток силового трехобмоточного трансформатора в таком режиме?*
3. *Возможен ли подобный режим на подстанциях с двухобмоточными трансформаторами?*

3. НАГРЕВ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ НОРМАЛЬНОЙ РАБОТЕ [4]

Цель практического занятия: В течение всего срока службы силовой трансформатор работает в переходных тепловых режимах, изменение которых, обусловленное как нагрузкой, так и атмосферными воздействиями, предсказать практически невозможно.

Цель занятия – разобраться, что собой представляет диаграмма распределения температур в трансформаторе и как меняются эти диаграммы для различных систем охлаждения силового трансформатора.

Порядок проведения практического занятия: В аудитории выполняется подробный разбор теоретической части занятия.

Теоретическая часть. По действующим стандартам под превышением температуры какой-либо части трансформатора подразумевается разность температур этой части и охлаждающей среды. Допустимые превышения температуры активных частей во многом влияют на внутреннее устройство, размеры, стоимость, нагрузочную способность и режимы эксплуатации трансформатора.

Наибольшая допустимая длительная нагрузка трансформатора зависит от номинальной мощности, являющейся гарантируемым параметром, температуры охлаждающей среды и от того, желает или не желает эксплуатирующее предприятие замедлить старение изоляционных материалов, сильно зависящее от температуры и длительности ее действия.

Наибольшая допустимая кратковременная нагрузка и ее длительность, кроме указанных выше факторов, зависят также от конструктивных особенностей трансформатора, его тепловой постоянной времени и предшествующей нагрузки.

При расчете трансформаторов и их систем охлаждения рассчитывается много превышений и перепадов температуры. Используемые обозначения поясняются на рис. 3.1 и в табл. 3.1. На рис. 3.1 в системе координат ϑ – температура и H – высота, показаны температуры, превышения и перепады температуры для частей трансформатора с естественной циркуляцией масла.

Продолжительное воздействие тепла, влаги, кислорода вызывает старение изоляционных материалов трансформатора и, прежде всего, тех, основой которых является целлюлоза.

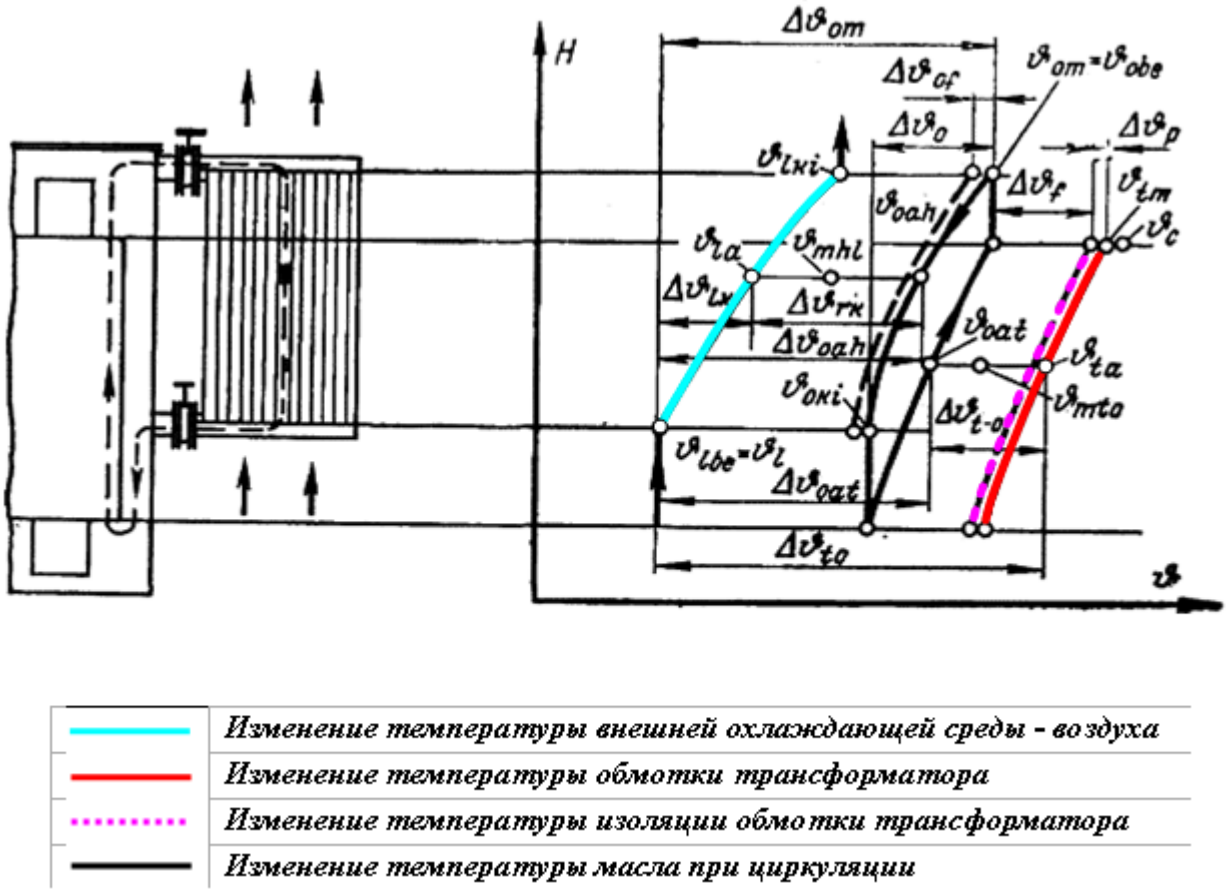


Рис. 3.1. Диаграмма распределения температур в трансформаторе с естественной циркуляцией масла (принятые обозначения сведены в табл. 3.1.) [4].

Процесс старения ведет к изменению исходных электрических, механических и химических свойств материала. Степень снижения *электрической прочности*, вызванная процессом старения, невелика. Однако возникающие изменения *механических характеристик изоляционных материалов* (прочности на разрыв, числа выдерживаемых перегибов) делают трансформатор чувствительным к возникающим при коротком замыкании перемещениям проводников, и в трансформаторе с состарившейся изоляцией легко может возникнуть витковое замыкание. Степень снижения предела прочности при растяжении по сравнению с исходным его значением является существенной уже после относительно непродолжительного времени старения. В отношении химических свойств самым существенным является изменение степени полимеризации, т.е. изменение, возникающее по длине молекулярных цепей изоляционного материала.

Накопленные в течение десятилетий результаты лабораторных исследований показывают, что у изоляционных материалов однозначно определяемой опасной температурной границы нет, а существует только экспоненциальная зависимость между степенью старения, температурой и длительностью ее действия.

Таблица 3.1.

Обозначения, принятые на $\vartheta - H$ диаграмме распределения температур силового трансформатора

Обозначение	Наименование
H	Высота
ϑ	Температура
ϑ_1	Температура охлаждающей среды, равная температуре воздуха у входа в теплообменник
ϑ_{lde}	Температура воздуха у входа в теплообменник
ϑ_{lki}	Температура воздуха у выхода из теплообменника
ϑ_{la}	Средняя температура воздуха в теплообменнике (имеется в виду воздух, циркулирующий в теплообменнике)
$\Delta\vartheta_{la}$	Превышение средней температуры воздуха в теплообменнике над температурой воздуха у входа в теплообменник
ϑ_{om}	Наибольшая температура масла в баке (при естественной циркуляции масла эта температура практически совпадает с температурой масла у входа в радиатор и принимается равной температуре масла у выхода из обмотки)
ϑ_{ode}	Температура масла у входа в теплообменник
$\Delta\vartheta_{om}$	Превышение наибольшей температуры масла в баке над температурой охлаждающей среды
ϑ_{oki}	Температура масла у выхода из теплообменника, принимаемая равной температуре масла у входа в об мотку
ϑ_{oat}	Средняя температура масла в обмотке (имеется в виду масло, циркулирующее в охлаждающих каналах у поверхности обмотки вне пограничного слоя)
$\Delta\vartheta_{oak}$	Повышение средней температуры масла в теплообменнике над температурой охлаждающей среды
$\Delta\vartheta_{rk}$	Логарифмическая разность температур масла и воздуха в теплообменнике
$\Delta\vartheta_{of}$	Перепад температуры между маслом и стенкой теплообменника
ϑ_{mki}	Средняя температура пограничного слоя воздуха в теплообменнике
ϑ_c	Температура наиболее нагретой точки обмотки
ϑ_{2m}	Средняя температура верхней катушки обмотки
ϑ_{ta}	Средняя температура обмотки
$\Delta\vartheta_{ta}$	Превышение средней температуры обмотки над температурой охлаждающей среды
$\Delta\vartheta_{t-o}$	Превышение средней температуры обмотки над средней температурой масла в обмотке
Y_{mto}	Средняя температура пограничного слоя масла у поверхности обмотки
$\Delta\vartheta_y$	Перепад температуры по толщине изоляции обмотки
$\Delta\vartheta_f$	Перепад температуры между поверхностью изоляции обмотки и маслом
$\Delta\vartheta_v$	Осевой перепад температуры масла в обмотке, представляющий собой разность температур масла у выхода и входа в обмотку
$\Delta\vartheta_o$	Осевой перепад температуры масла в теплообменнике, представляющий собой разность температур масла у входа и выхода из теплообменника (при естественной циркуляции масла принимается равным осевому перепаду температуры масла в обмотке)
$\Delta\vartheta_{oat}$	Превышение средней температуры масла в обмотке над температурой охлаждающей среды

Исходя из этого экспериментально установленного закона и принимая во внимание срок амортизации и морального износа трансформатора, можно определить температурную границу, при которой для данной скорости старения еще обеспечивается экономически оправданный срок службы [4].

Фактором, ускоряющим процесс старения, является увлажнение. Влага, находящаяся в трансформаторе, имеет три источника. Это влага, не удаленная в процессе сушки; влага, проникающая через негерметичные уплотнения и расширитель, и влага, возникающая, как побочный продукт, в процессе окисления масла. Кислород проникает в трансформатор через расширитель и через плохо герметизированные уплотнения контура охлаждения в местах пониженного по сравнению с атмосферным давления.

Срок службы

Время, по истечении которого изоляционный материал приходит в негодность, называется его сроком службы. Согласно закону Аррениуса срок службы E (лет) любого изоляционного материала определяется выражением [4]:

$$E = C \cdot e^{A - \frac{B}{T}} \tag{3.1}$$

где C – 1 год; A и B – постоянные, устанавливаемые экспериментально для изучаемого материала (A – безразмерная величина, B измеряется в Кельвинах); T – термодинамическая температура, ºК.

Для диапазона температур 80–140°С, имеющих место в трансформаторе, для определения срока службы справедлива формула Монтзингера

$$E = D \cdot e^{-p\vartheta} \tag{3.2}$$

где p – постоянная, °С$^{-1}$; ϑ – температура, ºС; D – постоянная, лет.

В рекомендациях МЭК по нагрузочной способности значение постоянной p, необходимое для определения срока службы, не указано, так как оно не могло быть согласовано из-за расхождения во мнениях по физическим свойствам изношенного изоляционного материала.

Износ изоляции

Существует единое мнение о том, что в диапазоне температур от 80 до 140°С каждые 6°С прироста температуры ϑ вызывают сокращение срока службы изоляции вдвое, т. е. износ удваивается. Это означает, что если в диапазоне 80–140°С температуре ϑ соответствует срок службы E, то для температуры $\vartheta + 6$°С срок службы составит $0{,}5E$ [4], т. е.

$$0{,}5E = D \cdot e^{-p(\vartheta+6)} \tag{3.3}$$

Разделив (3.2) на (3.3), можно вычислить постоянную *p:*

$$2 = e^{6p}$$

$$p = 0{,}1155°C^{-1} \qquad (3.4)$$

Относительный износ изоляции

Если в качестве базовой выбрана такая температура ϑ_a (°C), для которой срок службы принимается нормальным, то этот срок может быть отнесен к сроку службы, соответствующему любой другой температуре ϑ °C. Это безразмерное отношение, называемое относительным износом изоляции, обозначим через ξ.

Используя формулу Монтзингера, находим [4]:

$$\xi = \frac{D \cdot e^{-0{,}1155\vartheta_a}}{D \cdot e^{-0{,}1155\vartheta}} = e^{0{,}1155(\vartheta - \vartheta_a)} \qquad (3.5)$$

Пусть $\vartheta_a = 98°C$. Эта температура соответствует температуре наиболее нагретой точки трансформатора ϑ_c при температуре охлаждающей среды $\vartheta_l = 20°C$, превышении средней температуры обмотки $\Delta\vartheta_m = 65°C$, осевом перепаде температуры масла в обмотке $\Delta\vartheta_{t0} = 22°C$ и разности температуры наиболее нагретой точки и средней температуры верхней (наиболее нагретой) катушки $2°C$:

$$\vartheta_a = \vartheta_l + \Delta\vartheta_m + \frac{\Delta\vartheta_{t0}}{2} + 2 = 20 + 65 + \frac{22}{2} + 2 = 98°C$$

Цифровая диаграмма распределения температур масла и обмотки в трансформаторе с естественной циркуляцией масла при нормальном износе изоляции приведена на рис. 3.2.

Принято, что трансформатор с температурой наиболее нагретой точки, равной 98°C, стареет нормально. Срок службы в этом случае составляет несколько десятков лет. Естественно, за это время трансформатор может прийти в негодность по другим причинам или стать морально устаревшим, что потребует его замены.

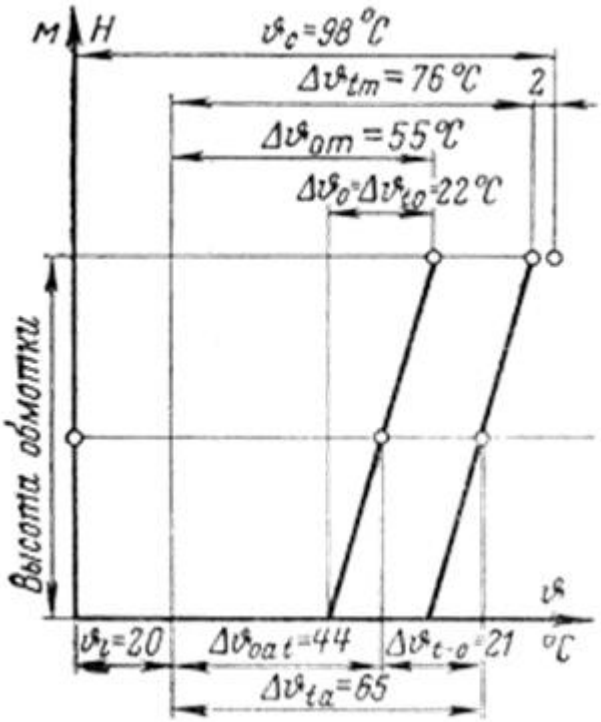


Рис. 3.2. Цифровая диаграмма распределения температур масло и обмотки в трансформаторе с естественной циркуляцией масла [4].

Если принять, что $\vartheta_a = 98°C$, то получим окончательную формулу для расчета относительного износа изоляции ξ при неизменной температуре ϑ:

$$\xi = e^{0,1155(\vartheta - 98)} \qquad (3.6)$$

Зависимость относительного износа изоляции ξ от температуры наиболее нагретой точки трансформатора ϑ_c приведена на рис. 3.3. С ее помощью можно оценить, например, как меняется суточный износ изоляции в различных режимах работы трансформатора.

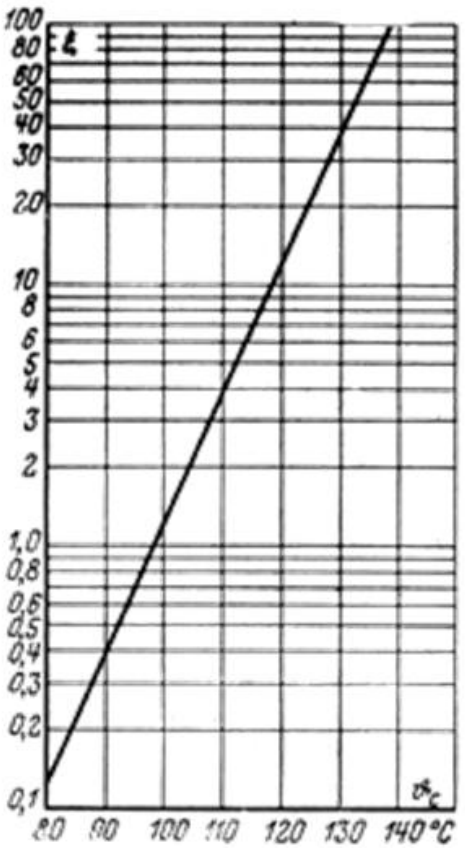
<u>Пример 3.1.</u> Температура наиболее нагретой точки обмотки в течение одних летних суток составляет: 98°С – в течение 12 ч, 104°С – в течение 8 ч и 116 – в течение 4 ч.

Необходимо определить относительный <u>суточный</u> износ изоляции.

Решение: используя данные рис. 3.3., получаем:

$$\xi = \frac{12 \cdot 1 + 8 \cdot 2 + 4 \cdot 8}{24} = 2,5$$

Очевидно, что одни сутки такой эксплуатации вызывают износ изоляции в 2,5 раза больше нормального.



ϑ_c, °C	ξ
80	0,125
86	0,25
92	0,5
98	1,0
104	2,0
110	4,0
116	8,0
122	16,0
128	32,0
134	64,0
140	128,0

Рис. 3.3. Зависимость относительного износа изоляции от температуры наиболее нагретой точки трансформатора

Продолжительность эксплуатации при постоянной температуре наиболее нагретой точки, приводящая к сокращению срока службы на одни сутки

Пусть трансформатор в пределах 24 ч должен эксплуатироваться в течение времени t_c при температуре наиболее нагретой точки ϑ_c, существенно превышающей 98°С, а в течение времени $24 - t_c$ эта температура значительно меньше 98°С. Тогда значение t_c, ч., которое обеспечило бы суточный износ изоляции, равный нормальному износу, может быть найдено по формуле [4]:

$$t_c = \frac{24}{\xi} \qquad (3.7)$$

Пример 3.2. Нагрузка трансформатора такова, что в течение большей части суток температура наиболее нагретой точки не превышает 80°С, а в период пика нагрузки, продолжающегося несколько часов, необходимо допустить нагрузку, при которой температура наиболее нагретой точки будет равна 122°С. Требуется определить, какая должна быть продолжительность пиковой нагрузки, чтобы износ изоляции за одни сутки не

был больше нормального износа (при номинальной нагрузке). Из таблицы находим значение ξ, соответствующее $\vartheta_c = 122°C$ (ξ = 16).

Тогда

$$t_c = \frac{24}{\xi} = \frac{24}{16} = 1{,}5 \div.$$

Естественно, что если принять во внимание тепловую постоянную времени трансформатора, то фактически пиковая нагрузка может длиться более 1,5 ч. При работе с температурой наиболее нагретой точки ниже 80°С относительный износ изоляции можно принять равным нулю.

Эквивалентная температура охлаждающей среды

Если при неизменной нагрузке в течение времени t температура охлаждающей среды ϑ_l резко изменяется, то температура наиболее нагретой точки ϑ_c также изменяется, хотя и с некоторым запаздыванием, обусловленным тепловой постоянной времени трансформатора. В таких случаях при определении ϑ_c необходимо исходить из <u>эквивалентной</u> температуры охлаждающей среды ϑ_{ls} (а не из среднеарифметической температуры), взятой за некоторый промежуток времени.

Эквивалентная температура охлаждающей среды определяется исходя из следующих допущений:

– срок службы трансформатора зависит только от температуры наиболее нагретой точки ϑ_c;

– изменение температуры охлаждающей среды влияет на изменение температуры наиболее нагретой точки таким же образом, как изменение нагрузки;

– прирост температуры охлаждающей среды на 6°С уменьшает срок службы изоляции вдвое, т. е. в такой же степени, как при возрастании температуры на 6°С из-за увеличения нагрузки.

Под эквивалентной температурой охлаждающей среды ϑ_{ls} подразумевается неизменная температура охлаждающей среды, при которой за время t имеет место такой же износ изоляции трансформатора, как при изменяющейся температуре охлаждающей среды $\vartheta_l(t)$. В этом случае справедливо уравнение [4]:

$$t \cdot e^{0,1155\vartheta_{ls}} = \int_0^t t \cdot e^{0,1155\vartheta_l(t)} dt \qquad (3.8)$$

Логарифмируя правую и левую части этого уравнения, находим:

$$\vartheta_{ls} = \frac{\ln\left(\int_0^t e^{0,1155\vartheta_l(t)} dt\right) - \ln t}{0,1155} \qquad (3.9)$$

Разделим интервал времени t на n равных промежутков, тогда интеграл можно заменить суммой. После преобразований получим следующую формулу для определения эквивалентной температуры охлаждающей среды [4]:

$$\vartheta_{ls} = 8,65 \cdot \ln\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} e^{0,1155\vartheta_{li}}\right) \qquad (3.10)$$

В отечественной практике применяется следующее выражение для эквивалентной температуры охлаждающей среды тождественное вышеприведенной формуле (3.10):

$$\vartheta_{ls} = 20 \cdot \ln\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} 2^{\vartheta_{li}/6}\right) \qquad (3.11)$$

<u>Пример 3.3.</u> Пусть в пределах года имеют место следующие среднемесячные температуры воздуха:

$\vartheta_{l1} = 30°C$ в течение 2 мес; $\vartheta_{l2} = 20°C$ в течение 6 мес;

$\vartheta_{l3} = 10°C$ в течение 2 мес; $\vartheta_{l4} = 0°C$ в течение 2 мес;

Среднегодовая температура воздуха (среднеарифметическая):

$$\vartheta_{lk} = \frac{30 \cdot 2 + 20 \cdot 6 + 10 \cdot 2 + 0 \cdot 2}{12} = 16,67°C.$$

Эквивалентная годовая температура воздуха

$$\vartheta_{ls} = 8,65 \cdot \ln\left(\frac{1}{12}(2 \cdot e^{0,1155 \cdot 30} + 6 \cdot e^{0,1155 \cdot 20} + 2 \cdot e^{0,1155 \cdot 10} + 2 \cdot e^{0,1155 \cdot 0}\right) = 20,8°C.$$

Как следует из расчета, эквивалентная годовая температура воздуха на <u>4,13°С больше</u> среднегодовой.

Виды охлаждения [4]

Циркуляция масла в контуре охлаждения осуществляется за счет гравитационных сил. Выделяющиеся в активной части потери путем конвективного теплообмена (теплоотдачи) передаются окружающему активную часть маслу.

Масло под действием воспринятых им потерь нагревается и его плотность уменьшается, в связи с чем оно в зоне активных частей устремляется вверх, а вместо переместившегося нагретого масла снизу поступает холодное. Нагретое масло отдает свое тепло более холодным стенкам радиаторов, температура масла падает, его плотность увеличивается и оно устремляется вниз. В радиаторах возникает поток масла, двигающийся вниз, т. е. в направлении, противоположном направлению его движения в активной части.

Циркуляция воздуха в радиаторах возникает либо естественным путем из-за уменьшения плотности нагретого воздуха, либо создается с помощью вентиляторов. В первом случае охлаждение происходит при естественной (рис. 3.4, 3.5), во втором – при принудительной циркуляции воздуха (рис. 3.6).

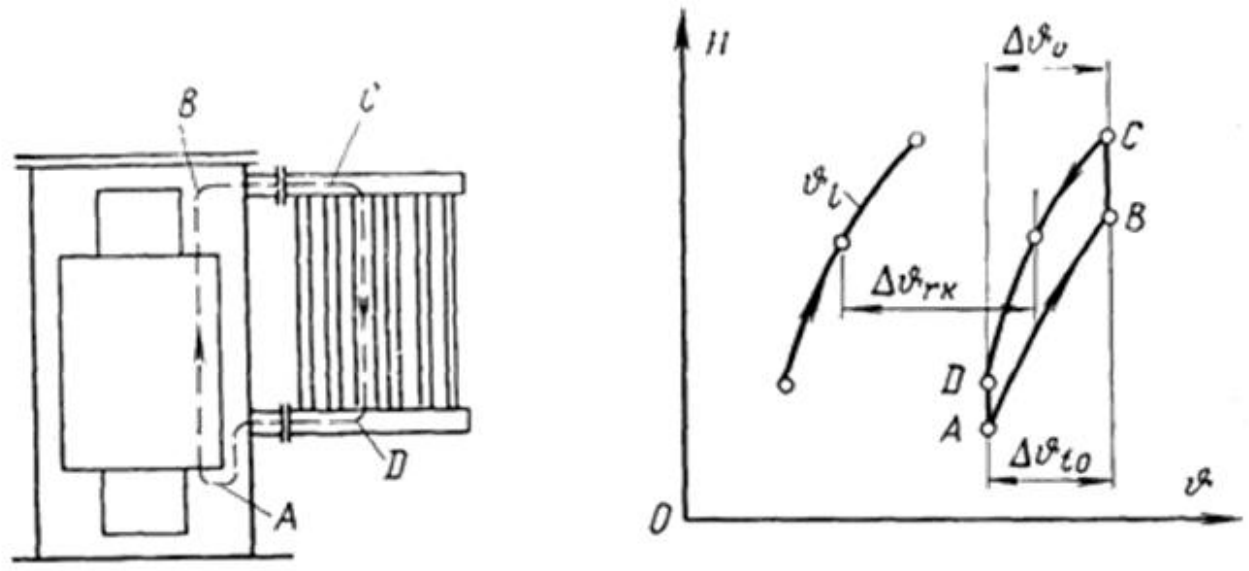


Рис. 3.4. Охлаждение при естественной циркуляции масла и воздуха [4].

Физический процесс, происходящий при естественной циркуляции масла и воздуха, представлен на рис. 3.4 в системе координат $\vartheta - H$. Поддерживающая циркуляцию подъемная сила пропорциональна площади, охваченной контуром *ABCDA*.

В точке *A* масло попадает в обмотку, нагревается, движется вверх и в точке *B* выходит из обмотки. На пути движения от точки *B* до точки *C*, т. е. до входа в радиатор, температура масла несколько падает, что обусловлено

теплоотдачей крышки и верхней части стенки бака. Между точками *C* и *D* в радиаторах масло охлаждается и движется вниз. Охлажденное масло перемещается от точки *D* до точки *A* и процесс повторяется.

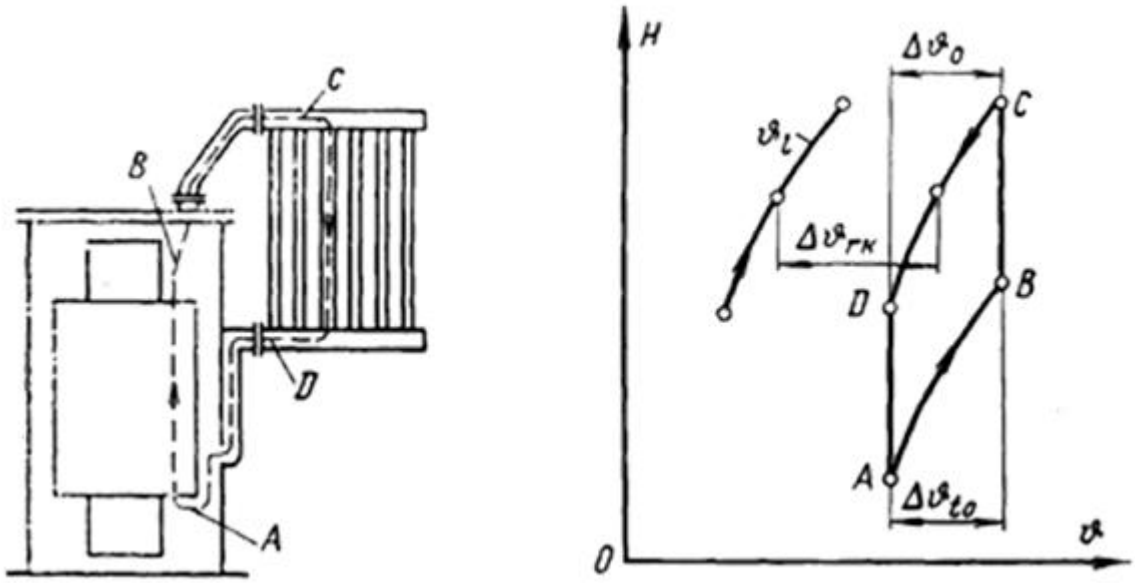


Рис. 3.5. Схема естественного масляного охлаждения трансформатора при высоко поднятых радиаторах.

Высокое расположение радиатора, как это показано на рис. 3.5, по сравнению с низким его расположением увеличивает при одинаковых потерях возникающую при охлаждении подъемную силу. Скорость движения масла в контуре охлаждения возрастет.

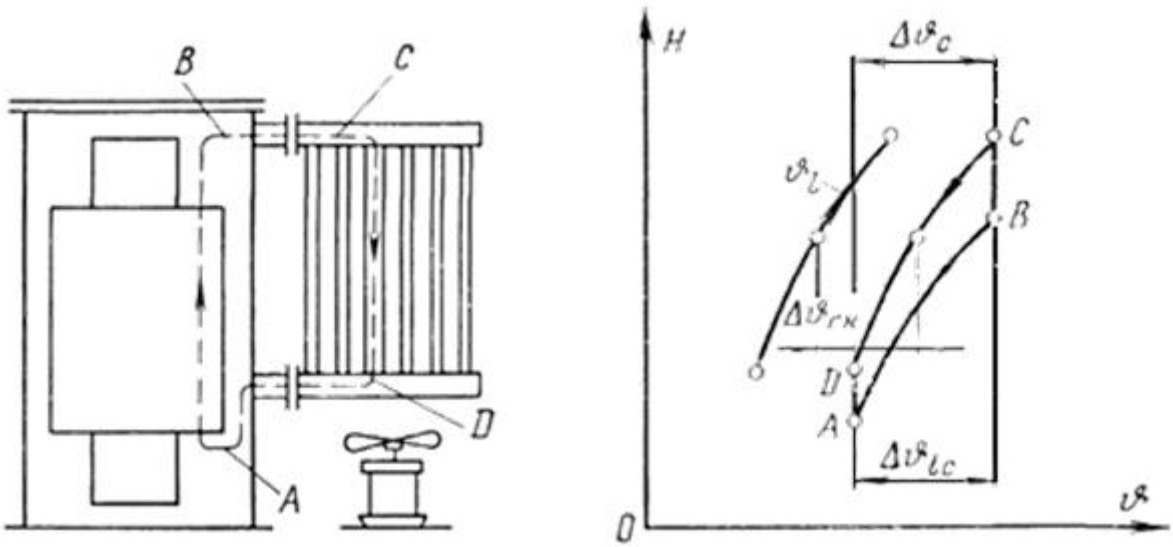


Рис. 3.6. Охлаждение при естественной циркуляции масла и принудительной циркуляции воздуха

Вентиляторы, установленные под радиаторами, нагнетают воздух в каналы между секциями радиаторов (рис. 3.6). Увеличение скорости движения воздуха увеличивает коэффициент теплоотдачи радиатора со стороны воздуха, благодаря чему отвод тех же потерь будет происходить при меньшем, чем при естественной циркуляции, перепаде температуры со стороны воздуха. Увеличение коэффициента теплоотдачи радиатора со стороны воздуха при тех же потерях, отводимых радиатором, приводит к более быстрому, чем при естественной циркуляции воздуха, охлаждению масла в трубах и участок кривой *C–D* становится более выпуклым.

При переходе с естественной на принудительную циркуляцию воздуха теплосъем радиатора увеличивается в 2,6 раза.

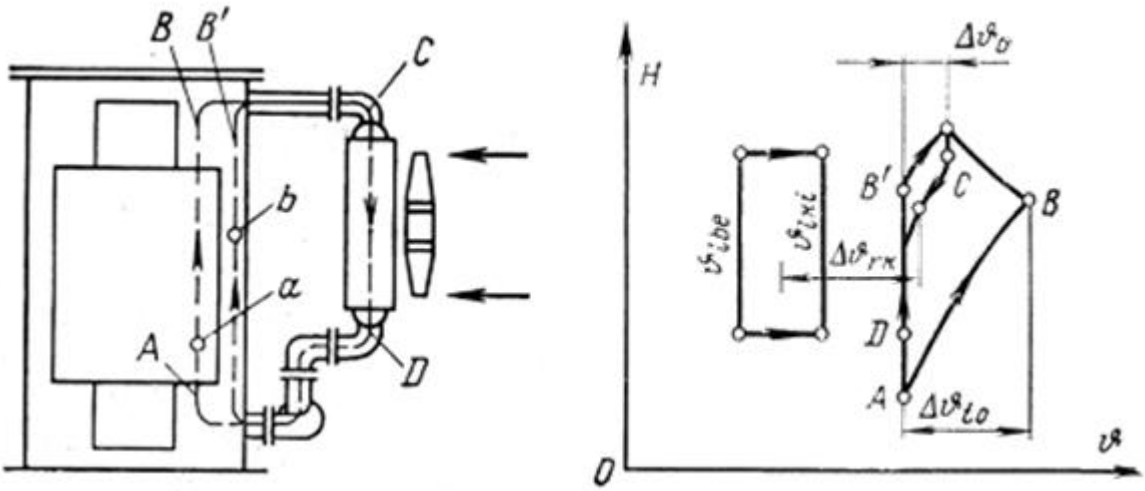


Рис. 3.7. Охлаждение при принудительной циркуляции масла и принудительной циркуляции воздуха

Вместо дорогих, требующих много места радиаторных батарей для трансформаторов большой мощности применяются более выгодные малогабаритные теплообменники, называемые охладителями. Для получения в этих охладителях большого коэффициента теплоотдачи со стороны масла необходимо увеличить скорость масла. Для увеличения скорости масла и преодоления гидравлического сопротивления охладителя в контур охлаждения включаются насосы. При этом внутри обмотки практически сохраняется естественная циркуляция масла, а скорость движения масла в обмотке определяется гравитационной подъемной силой и гидравлическим сопротивлением трению. Включение насоса влияет главным образом на работу охладителя. Для лучшего понимания вопроса обратимся к рис. 3.7.

Включение насоса мало влияет на процесс теплоотдачи в обмотке. Для этого вида охлаждения характерным является то, что нагретое в обмотке и

движущееся по пути ***a*** масло перемешивается с маслом, движущимся по параллельному пути ***b*** вдоль высоты бака. Из-за перемешивания непосредственное измерение температуры выходящего из обмотки нагретого масла затруднено и термодатчиками, размещенными под крышкой, измеряется температура перемешанного масла.

Из-за перемешивания в охладители поступает уже несколько охлажденное масло и, таким образом, температура масла на входе в охладитель меньше, чем наибольшая температура масла в обмотке. Перемешивание масла приводит также к тому, что при одних и тех же потерях насосом приходится перекачивать больше масла с пониженной температурой, чем это требовалось бы при отсутствии перемешивания. Поскольку скорость масла в обмотке мало отличается от скорости при естественной циркуляции, поверхностная плотность теплового потока обмотки не должна быть большей, чем при естественной циркуляции. Преимуществом применения охладителей с принудительной циркуляцией масла является то, что они занимают мало места, имеют меньшую удельную стоимость и могут быть размещены на любой высоте.

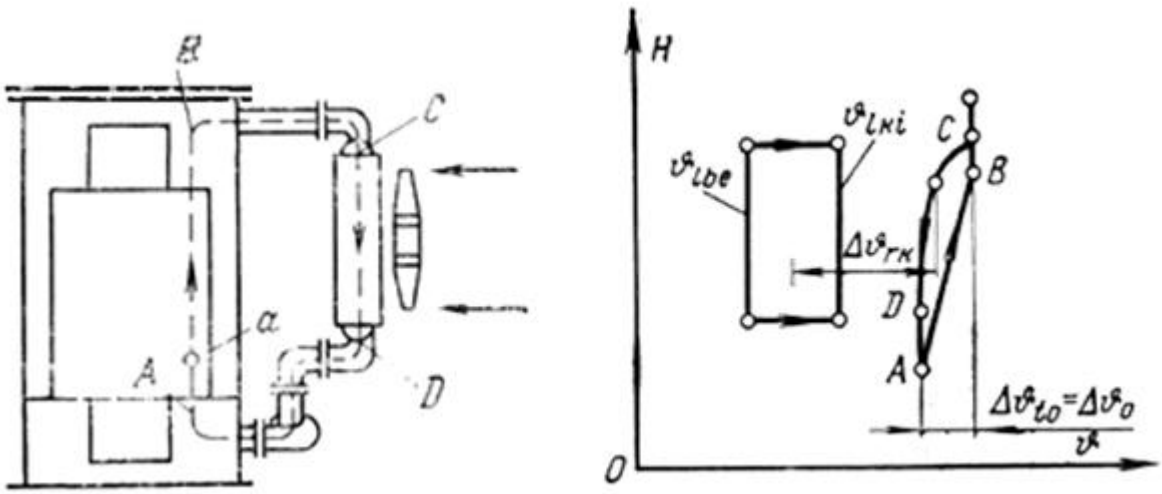


Рис. 3.8. Охлаждение при направленной циркуляции масла и принудительной циркуляции воздуха

Если через активную часть трансформатора пропускать все циркулирующее в системе охлаждения масло, т. е. ликвидировать параллельный путь ***b***, показанный на рис. 3.7, то придем к системе охлаждения с направленной циркуляцией масла – рис. 3.8. В этом случае насосы перекачивают не только масло, нагревающееся потерями активной части, но и масло, утекающее через неплотности контура направленной циркуляции. При правильном расчете в охладитель поступает масло с температурой, практически равной наибольшей температуре масла в активной части.

У поверхностей теплоотдачи элементов активной части скорость масла увеличится, в связи с чем возрастет их коэффициент теплоотдачи и уменьшится перепад температуры между поверхностью и маслом, что позволяет увеличить поверхностную плотность теплового потока, не переходя допустимого значения для превышения средней температуры обмотки.

Требования к отчету: По заданию преподавателя в отчете приводится описание принципиальной схемы и диаграмма распределения температур для одной из систем охлаждения силового трансформатора. При сдаче зачета необходимо уметь давать пояснения по существу выполненного задания, а также показать знание предмета в объеме программы.

Контрольные вопросы:

1. *Что такое «шестиградусное правило»*?
2. *Как действует теплообменник на основе термосифона*?
3. *Чем определяется подъемная сила, действующая на масло*?
4. *Почему при ненаправленной принудительной циркуляции масла возникает погрешность при оценке теплового состояния трансформатора?*

4. НАГРЕВ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА В РЕЖИМЕ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ [4]

Цель практического занятия: В режиме короткого замыкания, в силу быстротечности переходного режима, передачи теплоты от нагревающейся обмотки к маслу практически не происходит.

Цель работы – освоить методику определения изменения температуры обмотки за время протекания по обмотке сверхтока.

Порядок проведения практического занятия: В аудитории выполняется разбор теоретической части занятия и примера расчета. При работе над задачей, предназначенной для самостоятельного решения, может потребоваться дополнительная информация, за которой следует обратиться к [4].

Теоретическая часть. При коротком замыкании трансформатора выделяющиеся в обмотке потери от тока короткого замыкания увеличивают количество теплоты, содержащееся в проводах и витковой изоляции. Из-за кратковременности процесса (около 1 с) теплота маслу практически не передается. После прекращения короткого замыкания начинается процесс охлаждения и за время, равное нескольким постоянным времени, обмотка опять принимает температуру, имевшую место при нормальной нагрузке.

Все выделяющиеся в проводнике длиной l потери ввиду отсутствия теплоотдачи к маслу идут на увеличение количества теплоты, содержащегося в проводах и изоляции. Уравнение для изменения средней температуры обмотки за время короткого замыкания имеет следующий вид [4]:

$$\Delta\vartheta = \sqrt{e^{2t/a_1}\cdot\left[(\vartheta_{ta}+235)^2+\tau_{75}\cdot 960\right]-\tau_{75}\cdot 960}-(\vartheta_{ta}+235)=$$

$$=31\cdot\sqrt{e^{2t/a_1}\cdot\left[\left(\frac{\vartheta_{ta}+235}{31}\right)^2+\tau_{75}\right]-\tau_{75}}-(\vartheta_{ta}+235), \qquad (4.1)$$

где ϑ_{ta} – исходная средняя температура обмотки;

τ_{75} – относительные потери от вихревых токов в процентах основных потерь при 75°С;

t – время существования короткого замыкания.

Показатель степени величины e^{2t/a_1} <u>для меди</u> при учете теплоемкости изоляции равен:

$$\frac{2t}{a_1} = \frac{1}{2,55 + 0,685 \cdot \psi} \cdot \left(\frac{J}{10^8} \right)^2 \cdot t, \qquad (4.2)$$

Если теплоемкостью изоляции пренебречь, то

$$\frac{2t}{a_1} = 0,392 \cdot \left(\frac{J}{10^8} \right)^2 \cdot t, \qquad (4.3)$$

Показатель степени величины e^{2t/a_1} <u>для алюминия</u> при учете теплоемкости изоляции равен:

$$\frac{2t}{a_1} = \frac{1}{1,115 + 0,413 \cdot \psi} \cdot \left(\frac{J}{10^8} \right)^2 \cdot t, \qquad (4.4)$$

Если теплоемкостью изоляции пренебречь, то

$$\frac{2t}{a_1} = 0,897 \cdot \left(\frac{J}{10^8} \right)^2 \cdot t, \qquad (4.5)$$

В формулах (4.2) – (4.5):

J – плотность тока при коротком замыкании, А/м^2 ;

ψ – отношение площади поперечного сечения <u>изоляции проводника</u> к площади поперечного сечения <u>проводника.</u>

<u>Пример 4.1.</u> Трансформатор имеет напряжение короткого замыкания $u_k = 10\%$; при номинальной нагрузке плотность тока $J' = 3,5$ А/мм^2. В момент короткого замыкания средняя температура обмотки $\vartheta_{ta} = 85°C$, а относительные потери от вихревых токов $\tau_{75} = 15\%$. Теплоемкость изоляции проводников не учитывать. Обмотка изготовлена из меди.

Необходимо определить изменение температуры обмотки $\Delta\vartheta$ за $t = 3$с при трехфазном коротком замыкании и бесконечной мощности сети.

Решение: плотность тока при коротком замыкании:

$$J = J' \left[A/м^2 \right] \cdot \frac{100}{u_k} = 3,5 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{100}{10} \right) = 35 \cdot 10^6 \left[A/м^2 \right].$$

Показатель степени величины e^{2t/a_1} <u>для меди</u> при неучете теплоемкости изоляции равен:

$$\frac{2t}{a_1} = 0,392 \cdot \left(\frac{J}{10^8}\right)^2 \cdot t = 0,392 \cdot \left(\frac{35 \cdot 10^6}{10^8}\right)^2 \cdot 3 = 0,145.$$

Изменение температуры обмотки:

$$\Delta\vartheta = 31 \cdot \sqrt{e^{2t/a_1} \cdot \left[\left(\frac{\vartheta_{ta} + 235}{31}\right)^2 + \tau_{75}\right] - \tau_{75}} - (\vartheta_{ta} + 235) =$$

$$= 31 \cdot \sqrt{e^{0,145} \cdot \left[\left(\frac{85 + 235}{31}\right)^2 + 15\right] - 15} - (85 + 235) = 28°C.$$

Таким образом, в момент прекращения короткого замыкания средняя температура обмотки равна 85+28= 113°С.

<u>Пример 4.2.</u> Трехфазный автотрансформатор мощностью 250 МВ*А, напряжением 400/132 кВ с напряжением короткого замыкания $u_k = 12\%$, подсоединен со стороны 400 кВ к сети с мощностью короткого замыкания 20 000 МВ*А. Средняя температура обмотки при нагрузке, равной 150% поминальной, составляет 130°С. При этой нагрузке на вводах трансформатора со стороны 132 кВ возникает трехфазное короткое замыкание, продолжающееся 2 с. Обмотка напряжением 400 кВ намотана из проводников с размерами, указанными на рис. 4.1.

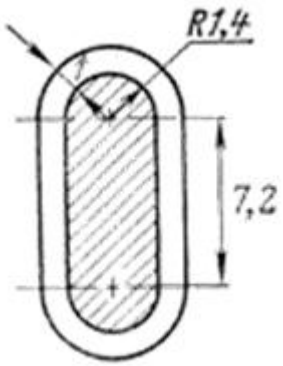


Рис. 4.1. Размеры проводника и изоляции обмотки 400 кВ [4].

Необходимо определить: какой будет температура обмотки в момент отключения короткого замыкания.

Решение: полное реактивное сопротивление схемы до места короткого замыкания с учетом реактивного сопротивления сети составит:

$$u'_k = u_k + \frac{S_T \cdot 100\%}{S_K} = 12\% + \frac{250 \cdot 100\%}{20000} = 13,25\%.$$

Плотность тока обмотки 400 кВ при нагрузке 250 МВА: $J' = 3,3$ А/мм^2.

Плотность тока при коротком замыкании:

$$J = J'\left[A/м^2\right] \cdot \frac{100}{u'_k} = 3,3 \cdot 10^6 \cdot \frac{100}{13,25} = 24,9 \cdot 10^6 \left[A/м^2\right].$$

Относительные потери от вихревых токов $\tau_{75} = 16\%$.

По данным рис. 4.1. площадь сечения изоляции:

$$A_s = 1 \cdot (2 \cdot 7,2 + 3,8 \cdot \pi) \cdot 10^{-6} = 26,3 \cdot 10^{-6} \left[м^2\right],$$

Площадь сечения меди:

$$A_r = 1 \cdot (7,2 \cdot 2,8 + 1,4^2 \cdot \pi) \cdot 10^{-6} = 26,33 \cdot 10^{-6} \left[м^2\right],$$

Следовательно

$$\psi = \frac{A_s}{A_r} = \frac{26,3 \cdot 10^{-6}}{26,33 \cdot 10^{-6}} \approx 1,$$

$$\frac{2t}{a_1} = \frac{1}{2,55 + 0,685 \cdot \psi} \cdot \left(\frac{J}{10^8}\right)^2 \cdot t = \frac{1}{2,55 + 0,685 \cdot 1} \cdot \left(\frac{24,9 \cdot 10^6}{10^8}\right)^2 \cdot 2 = 0,0383.$$

Увеличение средней температуры обмотки

$$\Delta\vartheta = 31 \cdot \sqrt{e^{2t/a_1} \cdot \left[\left(\frac{\vartheta_{ta} + 235}{31}\right)^2 + \tau_{75}\right] - \tau_{75}} - (\vartheta_{ta} + 235) =$$

$$= 31 \cdot \sqrt{e^{0,0383} \cdot \left[\left(\frac{130 + 235}{31}\right)^2 + 16\right] - 16} - (130 + 235) = 8°C.$$

Средняя температура обмотки в конце короткого замыкания: 130+8= 138°С.

Задачи для самостоятельного решения (вариант задается преподавателем):

Вариант	Задание
4.1	Определить изменение средней температуры обмотки трансформатора на подстанции **«Тында»** при КЗ, вид и место которого согласованы с преподавателем, для случаев: - срабатывания штатной защиты трансформатора; - отключения трансформатора резервной защитой; - отказа выключателя и действии УРОВ. Дополнительные данные для расчета: - средняя температура обмотки трансформатора в момент КЗ: **78^0С**; - относительные потери от вихревых токов: **12 %.**
4.2	Определить изменение средней температуры обмотки трансформатора на подстанции **«Завитая»** при КЗ, вид и место которого согласованы с преподавателем, для случаев: - срабатывания штатной защиты трансформатора; - отключения трансформатора резервной защитой; - отказа выключателя и действии УРОВ. Дополнительные данные для расчета: - средняя температура обмотки трансформатора в момент КЗ: **80^0С**; - относительные потери от вихревых токов: **14 %.**
4.3	Определить изменение средней температуры обмотки трансформатора на подстанции **«Призейская»** при КЗ, вид и место которого согласованы с преподавателем, для случаев: - срабатывания штатной защиты трансформатора; - отключения трансформатора резервной защитой; - отказа выключателя и действии УРОВ. Дополнительные данные для расчета: - средняя температура обмотки трансформатора в момент КЗ: **82^0С**; - относительные потери от вихревых токов: **12 %.**
4.4	Определить изменение средней температуры обмотки трансформатора на подстанции **«Светлая»** при КЗ, вид и место которого согласованы с преподавателем, для случаев: - срабатывания штатной защиты трансформатора; - отключения трансформатора резервной защитой; - отказа выключателя и действии УРОВ. Дополнительные данные для расчета: - средняя температура обмотки трансформатора в момент КЗ: **86^0С**; - относительные потери от вихревых токов: **15 %.**
4.5	Определить изменение средней температуры обмотки трансформатора на подстанции **«Талали»** при КЗ, вид и место которого согласованы с преподавателем, для случаев: - срабатывания штатной защиты трансформатора; - отключения трансформатора резервной защитой; - отказа выключателя и действии УРОВ. Дополнительные данные для расчета: - средняя температура обмотки трансформатора в момент КЗ: **80^0С**; - относительные потери от вихревых токов: **14 %.**

Требования к отчету: отчет должен содержать решенную задачу. При сдаче зачета необходимо уметь давать пояснения по существу выполненного задания, а также показать знание предмета в объеме программы.

Контрольные вопросы:

1. *Почему в режиме короткого замыкания не учитывается отвод тепла маслом от обмотки?*
2. *Поясните, что означает термин «средняя температура обмотки»?*
3. *Что такое «тепловая постоянная времени» обмотки?*

5. РАСЧЕТ УРАВНИТЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ И ЗАГРУЗКИ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ, ОТЛИЧАЮЩИХСЯ НОМИНАЛЬНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ [1]

Цель практического занятия: Параллельная работа трансформаторов возможна при выполнении известных условий [1 – 3, 6]. Если хотя бы одно из условий не соблюдается, то в контуре, образованном обмотками обоих трансформаторов, протекает уравнительный ток, изменяющий нагрузку каждого трансформатора.

Цель занятия – на практических примерах освоить расчет распределения нагрузки между параллельно работающими трансформаторами, у которых различны номинальные параметры.

Порядок проведения практического занятия: В аудитории выполняется разбор теоретической части занятия и примера расчета. При работе над задачей, предназначенной для самостоятельного решения, может потребоваться дополнительная информация, за которой следует обратиться к [1].

Теоретическая часть. При параллельной работе двухобмоточных трансформаторов всегда должно соблюдаться равенство напряжений КЗ и коэффициентов трансформации. В этом случае уравнительный ток (мощность) в замкнутом контуре, образованном параллельно включенными трансформаторами, не возникает и распределение между трансформаторами общей нагрузки происходит пропорционально их сопротивлениям, то есть пропорционально их мощностям. Кроме того, трансформаторы должны иметь тождественные группы соединения обмоток.

Не рекомендуется включать параллельно трансформаторы, отличающиеся по мощности более чем в три раза. Фактически напряжения КЗ даже в трансформаторах с одинаковыми номинальными данными заметно отличаются (допуск по [2] составляет ±10 %); помимо этого в ряде случаев на подстанциях установлены трансформаторы, отличающиеся по своим характеристикам. Иногда неравенство коэффициентов трансформации создается умышленно путем соответствующего подбора положений переключателя для того, чтобы использовать уравнительный ток желаемой величины для проверки релейной защиты или для прогрева трансформатора перед испытаниями его изоляции и т.д.

Для определения уравнительного тока используется упрощенная схема замещения i-го трансформатора индуктивным сопротивлением

$$x_i \approx \frac{U_{\kappa i}}{100} \cdot \frac{U_i^2}{S_i}, \qquad (5.1)$$

где $U_{\kappa i}$ – напряжение КЗ i-го трансформатора; U_i, S_i – соответственно номинальное напряжение и мощность i-го трансформатора. При постановке двух трансформаторов, отличающихся коэффициентами трансформации, под напряжение со стороны первичных обмоток, обнаруживается, что их вторичные напряжения отличаются на величину

$$\Delta U = U_1 - U_2, \qquad (5.2)$$

где U_1, U_2 – вторичные напряжения соответственно первого и второго трансформаторов.

Если оба указанных трансформатора включить параллельно, то напряжение ΔU будет приложено к последовательно соединенным сопротивлениям x_1 и x_2 первого и второго трансформатора соответственно (рис. 5.1).

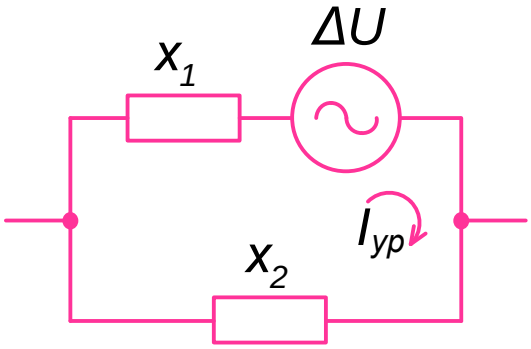


Рис. 5.1.

Величина уравнительного тока $I_{ур}$ связана с напряжением ΔU соотношением:

$$I_{ур} = \frac{\Delta U}{x_1 + x_2}, \qquad (5.3)$$

а уравнительная мощность равна

$$S_{ур} = I_{ур} \cdot U_1 = U_2 \cdot \frac{U_1 - U_2}{x_1 + x_2}, \qquad (5.4)$$

Подставляя в (5.4) x_1 и x_2 из (5.1), получаем после некоторых преобразований соотношение

$$\frac{S_{ур}}{S_1} = \frac{100 \cdot \left(\frac{U_1}{U_2} - 1 \right)}{U_{к1} \cdot \left(\frac{U_1}{U_2} \right)^2 + U_{к2} \cdot \frac{S_1}{S_2}}, \qquad (5.5)$$

Относительная разница в коэффициентах трансформации ΔK зависит от коэффициентов трансформации первого и второго трансформаторов K_1, K_2:

$$\Delta K = \frac{K_2 - K_1}{K_1} \cdot 100 = \left(\frac{K_2}{K_1} - 1 \right) \cdot 100, \qquad (5.6)$$

Подставляя в (5.6) вместо отношения величин напряжения отношения соответствующих коэффициентов трансформации, получаем:

$$\frac{S_{ур}}{S_1} = \frac{100 \cdot \left(\frac{K_2}{K_1} - 1 \right)}{U_{к1} \cdot \left(\frac{K_2}{K_1} \right)^2 + U_{к2} \cdot \frac{S_1}{S_2}} = \frac{\Delta K}{U_{к1} \cdot \left(\frac{\Delta K}{100} + 1 \right)^2 + U_{к2} \cdot \frac{S_1}{S_2}}. \qquad (5.7)$$

При включенных на общую нагрузку S трансформаторах результирующая нагрузка каждого из них может быть определена путем наложения уравнительной мощности на ту долю общей мощности, которая приходится на каждый трансформатор (при равенстве коэффициентов трансформации). Уравнительная мощность носит индуктивный характер – ее вектор повернут относительно вектора напряжения на 90°, в то время как вектор мощности нагрузки может иметь различный фазовый угол, определяемый величиной ***cosφ***. Поэтому сложение уравнительной мощности и мощности нагрузки следовало бы производить геометрически, однако для упрощения расчетов обычно применяется алгебраическое сложение, что приводит к некоторому завышении расчетных нагрузок. Для трансформатора с меньшим коэффициентом трансформации уравнительный ток должен прибавляться к току нагрузки, а для трансформатора с большим коэффициентом трансформации – вычитаться.

Мощность нагрузки распределяется между трансформаторами обратно пропорционально величине их сопротивлений

$$\frac{S_{н1}}{S_{н2}} = \frac{x_2}{x_1}, \qquad (5.8)$$

где $S_{н1}$, $S_{н2}$ – соответственно нагрузка первого и второго трансформатора при равенстве коэффициентов трансформации, то есть при отсутствии уравнительного тока. В то же время

$$S_{н1} + S_{н2} = S. \tag{5.9}$$

Таким образом

$$\frac{S_{н1}}{S} = \frac{1}{1 + \frac{x_1}{x_2}}, \tag{5.10}$$

Если в (5.10) подставить x_1 и x_2, рассчитанные по (5.1), получаем

$$\frac{S_{н1}}{S} = \frac{1}{1 + \frac{U_{к1}}{U_{к2}} \cdot \frac{S_2}{S_1}}. \tag{5.11}$$

<u>Пример 5.1.</u> Двухобмоточный трансформатор номинальной мощностью $S_1 = 25$ МВА, имеющий напряжение КЗ $U_{к1} = 10,5\%$, включен на параллельную работу со вторым трансформатором, имеющим номинальную мощность $S_2 = 63$ МВА и напряжение КЗ $U_{к2} = 10,5\%$. Относительная разность коэффициентов трансформации составляет $\Delta K = 10\%$ (у первого трансформатора величина K меньше).

Необходимо определить: величину уравнительной мощности, а также полную нагрузку каждого из трансформаторов, если они включены на общую нагрузку $S = S_1$.

<u>Решение:</u> В формулу (5.7) подставляем заданные условиями задачи величины:

$$\frac{S_{ур}}{S_1} = \frac{\Delta K}{U_{к1} \cdot \left(\frac{\Delta K}{100} + 1\right)^2 + U_{к2} \cdot \frac{S_1}{S_2}} = \frac{10}{10,5 \cdot \left(\frac{10}{100} + 1\right)^2 + 10,5 \cdot \frac{25}{63}} = 0,592.$$

$$S_{ур} = S_1 \cdot 0,592 = 25 \cdot 0,592 = 14,8 \text{ МВА}.$$

Часть общей загрузки, приходящейся на первый трансформатор, определяется по (5.11):

$$S_{н1} = S \cdot \frac{1}{1 + \frac{U_{к1}}{U_{к2}} \cdot \frac{S_2}{S_1}} = 25 \cdot \frac{1}{1 + \frac{10,5}{10,5} \cdot \frac{63}{25}} = 7,1 \text{ МВА}.$$

Так как у первого трансформатора коэффициент трансформации меньше, его полная нагрузка определяется как сумма величин $S_{н1}$ и $S_{ур}$:

$$S_{полн.1} = S_{н1} + S_{ур} = 7{,}1 + 14{,}8 = 21{,}9 \text{ МВА.}$$

Часть общей нагрузки, приходящаяся на второй трансформатор, составляет:

$$S_{н2} = S - S_{н1} = 25 - 7{,}1 = 17{,}9 \text{ МВА.}$$

Полная нагрузка второго трансформатора определяется как разность $S_{н2}$ и $S_{ур}$:

$$S_{полн.2} = S_{н2} - S_{ур} = 17{,}9 - 14{,}8 = 3{,}1 \text{ МВА.}$$

Задачи для самостоятельного решения (вариант задается преподавателем):

Вариант	Задание
5.1	Двухобмоточный трансформатор номинальной мощностью $S_1 = 10$ МВА, имеющий напряжение КЗ $U_{к1} = 10{,}5\%$, включен на параллельную работу со вторым трансформатором, имеющим номинальную мощность $S_2 = 25$ МВА и напряжение КЗ $U_{к2} = 10{,}5\%$. Относительная разность коэффициентов трансформации составляет $\Delta K = 8\%$ (у первого трансформатора величина K больше). ***Необходимо определить:*** величину уравнительной мощности, а также полную нагрузку каждого из трансформаторов, если они включены на общую нагрузку $S = 12$ МВА.
5.2	Двухобмоточный трансформатор номинальной мощностью $S_1 = 16$ МВА, имеющий напряжение КЗ $U_{к1} = 10{,}5\%$, включен на параллельную работу со вторым трансформатором, имеющим номинальную мощность $S_2 = 25$ МВА и напряжение КЗ $U_{к2} = 10{,}5\%$. Относительная разность коэффициентов трансформации составляет $\Delta K = 8\%$ (у первого трансформатора величина K меньше). ***Необходимо определить:*** величину уравнительной мощности, а также полную нагрузку каждого из трансформаторов, если они включены на общую нагрузку $S = 18$ МВА.

Вариант	Задание
5.3	Двухобмоточный трансформатор номинальной мощностью $S_1 = 25$ МВА, имеющий напряжение КЗ $U_{к1} = 10,5\%$, включен на параллельную работу со вторым трансформатором, имеющим номинальную мощность $S_2 = 40$ МВА и напряжение КЗ $U_{к2} = 10,5\%$. Относительная разность коэффициентов трансформации составляет $\Delta K = 6\%$ (у первого трансформатора величина K больше). ***Необходимо определить:*** величину уравнительной мощности, а также полную нагрузку каждого из трансформаторов, если они включены на общую нагрузку $S = 22$ МВА.
5.4	Двухобмоточный трансформатор номинальной мощностью $S_1 = 16$ МВА, имеющий напряжение КЗ $U_{к1} = 10,5\%$, включен на параллельную работу со вторым трансформатором, имеющим номинальную мощность $S_2 = 40$ МВА и напряжение КЗ $U_{к2} = 10,5\%$. Относительная разность коэффициентов трансформации составляет $\Delta K = 10\%$ (у первого трансформатора величина K меньше). ***Необходимо определить:*** величину уравнительной мощности, а также полную нагрузку каждого из трансформаторов, если они включены на общую нагрузку $S = 16$ МВА.
5.5	Двухобмоточный трансформатор номинальной мощностью $S_1 = 40$ МВА, имеющий напряжение КЗ $U_{к1} = 10,5\%$, включен на параллельную работу со вторым трансформатором, имеющим номинальную мощность $S_2 = 63$ МВА и напряжение КЗ $U_{к2} = 10,5\%$. Относительная разность коэффициентов трансформации составляет $\Delta K = 10\%$ (у первого трансформатора величина K больше). ***Необходимо определить:*** величину уравнительной мощности, а также полную нагрузку каждого из трансформаторов, если они включены на общую нагрузку $S = 42$ МВА.

Требования к отчету: отчет должен содержать решенную задачу. При сдаче зачета необходимо уметь давать пояснения по существу выполненного задания, а также показать знание предмета в объеме программы.

Контрольные вопросы:

1. *Назовите условия, которые должны соблюдаться при включении силовых трансформаторов на параллельную работу.*
2. *Как определяется результирующая нагрузка каждого из параллельно работающих трансформаторов в случае, когда какие-либо параметры трансформаторов отличаются?*
3. *Почему при различии параметров параллельно работающих силовых трансформаторов возникает уравнительный ток?*

6. РАСЧЕТ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ И ЭНЕРГИИ В ТРЕХОБМОТОЧНОМ ТРАНСФОРМАТОРЕ [1]

Цель практического занятия: При распределении электрической энергии часто встречается необходимость питать при помощи трансформаторов одновременно две сети с различными напряжениями. Для этой цели вместо требующихся для этого отдельных двухобмоточных трансформаторов с различными коэффициентами трансформации удобнее и экономичнее применять трехобмоточные трансформаторы. Это позволяет упростить и удешевить трансформаторную подстанцию.

Цель занятия – освоить методику расчета потерь мощности и энергии в трехобмоточном силовом трансформаторе, либо автотрансформаторе.

Порядок проведения практического занятия: В аудитории выполняется подробный разбор теоретической части занятия и приведенного примера.

Теоретическая часть. Потери активной мощности в трехобмоточном трансформаторе определяются как сумма потерь холостого хода и нагрузочных потерь в каждой из трех обмоток:

$$p = p_x + p_{нагр.В} + p_{нагр.С} + p_{нагр.Н}, \qquad (6.1)$$

где $p_{нагр.В}$, $p_{нагр.С}$, $p_{нагр.Н}$ - нагрузочные потери, соответственно, в обмотках ВН, СН и НН.

Нагрузочные потери в каждой из обмоток связаны с потерями КЗ в тех же обмотках

$$p_{нагр.В} = p_В \cdot \left(\frac{S_В}{S}\right)^2,$$

$$p_{нагр.С} = p_С \cdot \left(\frac{S_С}{S}\right)^2, \qquad (6.2)$$

$$p_{нагр.Н} = p_Н \cdot \left(\frac{S_Н}{S}\right)^2,$$

где $p_В$, $p_С$, $p_Н$ - потери КЗ в обмотках ВН, СН и НН соответственно;

$S_В$ - нагрузка обмотки ВН:

$$S_В = S_С + S_Н, \qquad (6.3)$$

В справочной литературе приводятся определенные в опытах величины потерь КЗ между отдельными парами обмоток: p_{BC}, p_{BH}, p_{CH}. Рассчитать интересующие нас потери КЗ в каждой обмотке можно, используя следующую систему формул:

$$\begin{aligned} p_B &= 0{,}5 \cdot \left(p_{BC} + p_{BH} - p_{CH} \right), \\ p_C &= 0{,}5 \cdot \left(p_{BC} + p_{CH} - p_{BH} \right), \\ p_H &= 0{,}5 \cdot \left(p_{BH} + p_{CH} - p_{BC} \right). \end{aligned} \tag{6.4}$$

Работа трансформатора связана с потреблением из питающей сети реактивной мощности, подразделяющейся на реактивные потери холостого хода Q_x и реактивные нагрузочные $Q_н$, определяемые по формулам:

$$Q_x = \frac{I_0}{100} \cdot S, \tag{6.5}$$

$$Q_н = U_{SB} \cdot \frac{S_B^2}{100 \cdot S} + U_{SC} \cdot \frac{S_C^2}{100 \cdot S} + U_{SH} \cdot \frac{S_H^2}{100 \cdot S}, \tag{6.6}$$

где U_{SB}, U_{SC}, U_{SH} - реактивные составляющие напряжения КЗ соответственно обмоток высшего, среднего и низшего напряжений.

Если полагать напряжение КЗ чисто реактивным, тогда

$$Q_н \approx U_B \cdot \frac{S_B^2}{100 \cdot S} + U_C \cdot \frac{S_C^2}{100 \cdot S} + U_H \cdot \frac{S_H^2}{100 \cdot S}, \tag{6.7}$$

Величины напряжения КЗ обмоток определяются, исходя из величин напряжения КЗ между обмотками по системе формул, аналогичной (6.4).

Потребление трансформатором реактивной мощности вызывает увеличение полного тока в питающий трансформатор сети, что сопряжено с увеличением потерь активной мощности в этой сети Δp. Эти дополнительные потери определяются по формуле

$$\Delta p = K_Э \cdot \left(Q_x + Q_н \right), \tag{6.8}$$

где $K_Э$ - величина экономического коэффициента - зависит от параметров сети, места размещения источника реактивной мощности, покрывающего потребление ее трансформатором, а также от режима энергосистемы; в ряде случаев принимаются разные значения коэффициента $K_Э$ для потерь Q_x и $Q_н$ (по условиям задачи величина $K_Э$ задана).

Суммарные годовые потери энергии в трансформаторе (без учета потребления реактивной мощности) определяются по формуле

$$W = p_x \cdot \tau_1 + (p_{нагр.В} + p_{нагр.С} + p_{нагр.Н}) \cdot \tau_2, \qquad (6.9)$$

где τ_1 - суммарная (за год) продолжительность нахождения трансформатора под напряжением, ч; τ_2 - время максимальных потерь, ч.

Величина τ_1 может быть определена через коэффициент плановых простоев $K_п$, который указывает, какую часть времени (в среднем за год) трансформатор находится в отключенном состоянии в связи с проведением работ по техническому обслуживанию:

$$\tau_1 = 8760 \cdot (1 - K_п). \qquad (6.10)$$

Принимая в соответствии с [3] для трансформатора 110 кВ

$$K_п = 7{,}5 \cdot 10^{-3},$$

получаем

$$\tau_1 = 8760 \cdot (1 - 7{,}5 \cdot 10^{-3}) \approx 8700 \text{ ч.} \qquad (6.11)$$

Время потерь τ_2 связано с параметрами, характеризующими конфигурацию годового графика передаваемой через трансформатор активной мощности, соотношением:

$$\tau_2 = 2 \cdot T_м - 8760 + \frac{8760 - T_м}{1 + \dfrac{T_м}{8760} - 2 \cdot a} \cdot (1 - a)^2 \text{ ч.} \qquad (6.12)$$

С учетом дополнительных потерь активной мощности в питающей сети, вызванных потреблением трансформатором реактивной мощности, суммарные годовые потери энергии в трансформаторе определяются как

$$W' = (p_x + K_Э \cdot Q_x) \cdot \tau_1 + (p_{нагр.В} + p_{нагр.С} + p_{нагр.Н} + K_Э \cdot Q_н) \cdot \tau_2, \qquad (6.13)$$

Пример 6.1. Силовой трансформатор 110 кВ мощностью $S = 40$ МВ·А имеет следующие значения потерь мощности:

- потери холостого хода $P_x = 45$ кВт;

- потери КЗ $P_{ВН} = 207$ кВт; $P_{ВС} = 177$ кВт; $P_{СН} = 150$ кВт;

Ток холостого хода трансформатора $I_0 = 0{,}6\%$ от его номинального тока.

Напряжение КЗ между обмотками: $U_{ВН} = 17\%$, $U_{ВС} = 10{,}5\%$, $U_{СН} = 6\%$.

Параметры годового графика нагрузки:

- максимальная нагрузка на стороне СН $S_C = 25$ МВ·А;

- максимальная нагрузка на стороне НН $S_H = 15$ МВ·А;

- отношение минимальной нагрузки к максимальной, одинаковое для обмоток СН и НН, $a = \left(S_{min} / S_{max}\right) = 0,3$.

Годовое число часов использования максимальной активной нагрузки, одинаковое для обмоток СН и НН, $T_м = 3000$ часов.

Необходимо определить:

потери мощности и годовые потери энергии в трансформаторе. Экономический коэффициент равен $K_Э = 0,06$ кВт/кВ. Соотношение активной и реактивной составляющих в нагрузках можно принять одинаковым для обмоток СН и НН. Мощность всех трех обмоток трансформатора также одинакова.

<u>Решение:</u> В первую очередь по (6.4) определяется активные потери КЗ отдельно для обмоток ВН, СН и НН:

$$p_B = 0,5 \cdot \left(p_{BC} + p_{BH} - p_{CH}\right) = 0,5 \cdot \left(177 + 207 - 150\right) = 117 \text{ кВт},$$

$$p_C = 0,5 \cdot \left(p_{BC} + p_{CH} - p_{BH}\right) = 0,5 \cdot \left(177 + 150 - 207\right) = 60 \text{ кВт},$$

$$p_H = 0,5 \cdot \left(p_{BH} + p_{CH} - p_{BC}\right) = 0,5 \cdot \left(207 + 150 - 177\right) = 90 \text{ кВт}.$$

Нагрузка обмотки ВН в соответствии с (6.3) равна

$$S_B = S_C + S_H = 25 + 15 = 40 \text{ МВА}.$$

Активные нагрузочные потери рассчитываются по формуле (6.2)

$$p_{нагр.B} = p_B \cdot \left(\frac{S_B}{S}\right)^2 = 117 \cdot \left(\frac{40}{40}\right)^2 = 117 \text{ кВт},$$

$$p_{нагр.C} = p_C \cdot \left(\frac{S_C}{S}\right)^2 = 60 \cdot \left(\frac{25}{40}\right)^2 = 60 \cdot 0,39 = 23,4 \text{ кВт},$$

$$p_{нагр.H} = p_H \cdot \left(\frac{S_H}{S}\right)^2 = 90 \cdot \left(\frac{15}{40}\right)^2 = 90 \cdot 0,14 = 12,6 \text{ кВт}.$$

Напряжения КЗ обмоток определяются по формулам (6.4)

$$U_B = 0,5 \cdot \left(U_{BC} + U_{BH} - U_{CH}\right) = 0,5 \cdot \left(10,5 + 17 - 6\right) = 10,8\%,$$

$$U_C = 0,5 \cdot \left(U_{BC} + U_{CH} - U_{BH}\right) = 0,5 \cdot \left(10,5 + 6 - 17\right) = 0\%,$$

$$U_H = 0,5 \cdot \left(U_{BH} + U_{CH} - U_{BC}\right) = 0,5 \cdot \left(17 + 6 - 10,5\right) = 6,3\%.$$

По формулам (6.5) и (6.7) определяются реактивные потери холостого хода и реактивные нагрузочные потери

$$Q_x = \frac{I_0}{100} \cdot S = \frac{0,6}{100} \cdot 40 \cdot 10^3 = 240 \text{ кВА},$$

$$Q_н = U_B \cdot \frac{S_B^2}{100 \cdot S} + U_C \cdot \frac{S_C^2}{100 \cdot S} + U_H \cdot \frac{S_H^2}{100 \cdot S} =$$

$$= 10,8 \cdot \frac{40^2 \cdot 10^6}{100 \cdot 40 \cdot 10^3} + 6,3 \cdot \frac{15^2 \cdot 10^6}{100 \cdot 40 \cdot 10^3} = 10^3 \cdot (0,4 \cdot 10,8 + 0,056 \cdot 6,3) =$$

$$= 10^3 \cdot (4,3 + 0,35) \approx 4700 \text{кВА}$$

Потери активной мощности в трансформаторе по (6.1) составляет

$$p = p_x + p_{нагр.B} + p_{нагр.C} + p_{нагр.H} = 45 + 117 + 23,4 + 12,6 = 198 \text{ кВт}.$$

Дополнительные потери в сети, связанные с потреблением трансформатором реактивной мощности, определяются по (6.8):

$$\Delta p = K_Э \cdot \left(Q_x + Q_н\right) = 0,06 \cdot (240 + 4700) = 0,06 \cdot 4940 = 296 \text{ кВт}.$$

Суммарные потери активной мощности, учитывающие как потери в трансформаторе, так и дополнительные потери в сети, равны:

$$p_\Sigma = p + \Delta p = 198 + 296 = 494 \text{ кВт}.$$

Находим в соответствии с (6.12) время потерь τ_2

$$\tau_2 = 2 \cdot T_м - 8760 + \frac{8760 - T_м}{1 + \frac{T_м}{8760} - 2 \cdot a} \cdot (1 - a)^2 =$$

$$= 2 \cdot 3000 - 8760 + \frac{8760 - 3000}{1 + \frac{3000}{8760} - 2 \cdot 0,3} \cdot (1 - 0,3)^2 =$$

$$= 6000 - 8760 + \frac{5760}{1 + 0,34 - 0,6} \cdot 0,7^2 =$$

$$= 6000 - 8760 + \frac{5760}{0,74} \cdot 0,49 = -2760 + 3820 = 1060 \text{ ч}.$$

Время потерь τ_1 принимаем в соответствии с (4.11):

$$\tau_1 = 8700 \text{ ч}.$$

По (6.9) определяются суммарные годовые потери энергии без учета потребления трансформатором реактивной мощности:

$$W = p_x \cdot \tau_1 + (p_{нагр.В} + p_{нагр.С} + p_{нагр.Н}) \cdot \tau_2 =$$
$$= 45 \cdot 8700 + (117 + 23,4 + 12,6) \cdot 1060 =$$
$$= 45 \cdot 8700 + 153 \cdot 1060 = (391 + 162) \cdot 10^3 = 553 \text{МВт} \cdot \text{ч}.$$

Суммарные годовые потери энергии, учитывающие потребление трансформатором реактивной мощности, рассчитываются по (6.13):

$$W' = (p_x + K_Э \cdot Q_x) \cdot \tau_1 + (p_{нагр.В} + p_{нагр.С} + p_{нагр.Н} + K_Э \cdot Q_н) \cdot \tau_2 =$$
$$= (45 + 0,06 \cdot 240) \cdot 8700 + (117 + 23,4 + 12,6 + 0,06 \cdot 4700) \cdot 1060 = 977 \text{МВт} \cdot \text{ч}.$$

При сдаче зачета необходимо уметь давать пояснения по существу рассмотренного практического занятия, а также показать знание предмета в объеме программы.

Контрольные вопросы:

1. *Назовите четыре исполнения трехобмоточных трансформаторов по соотношению мощностей их обмоток.*
2. *Как, в соответствии со стандартом, обозначаются выводы обмоток трехобмоточных трансформаторов?*
3. *Что такое «типовая мощность» автотрансформатора?*
4. *Что такое «потери холостого хода»?*

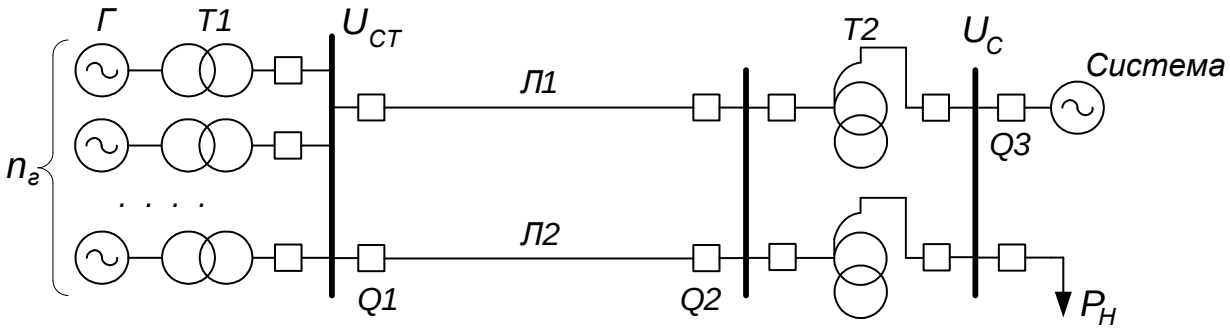
7. ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ УЗЛА НАГРУЗКИ ПРИ ПОТЕРЕ СВЯЗИ С СИСТЕМОЙ НЕОГРАНИЧЕННОЙ МОЩНОСТИ [5]

Цель практического занятия: Условия работы узла нагрузки могут значительно измениться, если по каким-либо причинам будет потеряна связь с одним из источников питания.

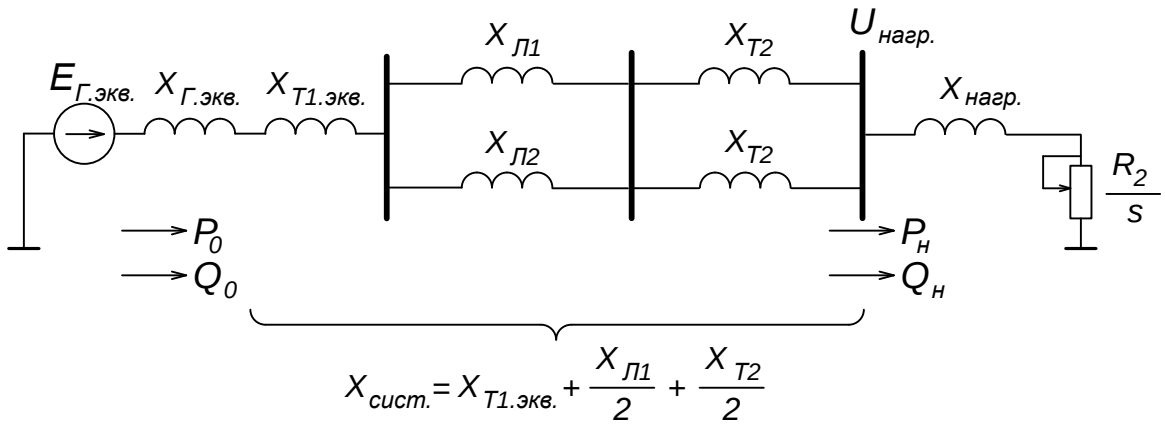
Цель работы – уяснить методику оценки статической устойчивости узла нагрузки в подобных режимах.

Порядок проведения практического занятия: В аудитории выполняется подробный разбор теоретической части занятия и приведенного примера.

Теоретическая часть. В случае отключения выключателя *Q3* - рис. 7.1, *а* - баланс мощности в оставшейся части системы сохранится. Но напряжение на шинах нагрузки $U_{нагр.}$ будет теперь зависеть от режима работы эквивалентной асинхронной нагрузки.



а)



б)

Рис. 7.1. Расчетная схема для анализа устойчивости асинхронной нагрузки.

При определении запаса устойчивости в качестве независимой переменной теперь должна рассматриваться э.д.с. $E_{Г.экв.}$, зависящая от вида

регулирования возбуждения генератора (см. [5, 7]). Генератор вводится в схему замещения соответствующим сопротивлением $x_{Г.экв.}$. Расчетная схема приведена на рис. 7.1, *б*.

На схеме нагрузка представлена в виде комплексного сопротивления в относительных единицах:

$$z_{нагр} = r_{нагр} + j \cdot x_{нагр} = \frac{S_б}{S_{нагр}} \cdot \left(cos\varphi_{нагр} + j \cdot sin\varphi_{нагр} \right). \qquad (7.1)$$

Активное сопротивление схемы замещения R_2 эквивалентного асинхронного двигателя определяется как

$$R_2 = r_{нагр.} \cdot s_0, \qquad (7.2)$$

где s_0 - скольжение эквивалентного асинхронного двигателя, замещающего нагрузку, при $U_{нагр.0} = 1$.

Для обеспечения устойчивости асинхронной нагрузки необходимо выполнение прямого критерия устойчивости [5]

$$\frac{dP}{ds} > 0, \qquad (7.3)$$

что эквивалентно условиям

$$P_{max} > P_{нагр.}; \qquad s_{кр.} > s_0, \qquad (7.4)$$

где

$$P_{max} = \frac{\left(E_{Г.экв.}\right)^2}{2 \cdot x_\Sigma}; \qquad s_{кр.} = \frac{R_2}{x_\Sigma}; \qquad x_\Sigma = x_{Г.экв.} + x_{сист.} + x_{нагр.}.$$

Так как $P_0 = \frac{\left(E_{Г.кр.}\right)^2}{2 \cdot x_\Sigma}$ то условие устойчивости (42) может быть записано в виде

$$E_Г > E_{Г.кр.}; \qquad s_{кр.} > s_0; \qquad E_{Г.кр.} = \sqrt{2 \cdot P_0 \cdot x_\Sigma}. \qquad (7.5)$$

По известному значению э.д.с. $E_{Г.кр.}$ можно найти соответствующее ей критическое напряжение на шинах нагрузки

$$U_{нагр.кр.} = \sqrt{\left(E_{Г.кр.} - \frac{Q_0 \cdot \left(x_{Г.экв.} + x_{сист.}\right)}{E_{Г.кр.}}\right)^2 + \left(\frac{P_0 \cdot \left(x_{Г.экв.} + x_{сист.}\right)}{E_{Г.кр.}}\right)^2}, \quad (7.6)$$

и определить запас статической устойчивости нагрузки по напряжению

$$k_{зап.U} = \frac{U_{нагр.0} - U_{нагр.кр.}}{U_{нагр.0}} \cdot 100\% . \quad (7.7)$$

Результаты расчета для различных видов АРВ генератора и его отсутствии представляются в виде таблицы и делаются соответствующие выводы.

<u>Пример 7.1.</u> Для простейшей электроэнергетической системы (ЭЭС), приведенной на рис. 7.1 *а,б,* рассчитать коэффициент запаса устойчивости нагрузки для следующих случаев:

1) выключатель *Q3* включен;
2) выключатель *Q3* отключен, генератор не имеет АРВ;
3) выключатель *Q3* отключен, на генераторе установлено АРВ ПД;
4) выключатель *Q3* отключен, на генераторе – АРВ СД.

Генератор - неявнополюсный.

Решение. Рассматриваемый пример аналогичен задаче 7.6 [5]. Параметры элементов схемы замещения и параметры режима возьмем из примеров 1 и 2 [7]. Приготовим их для последующих расчетов в виде табл. 7.1:

Таблица 7.1

	$x_{Г.экв.}$ *о.е.*	$x_{сист.}$ *о.е.*	$P_н$, *о.е.*	$Q_н$, *о.е.*	$cos\varphi_н$, *о.е.*	s_0, *о.е.*	T_j, *с*
Генератор без АРВ	0,4	0,15	2,0	1,344	0,83	0,03	6
Генератор с АРВ ПД	0,07						
Генератор с АРВ СД	0						

Рассчитаем по (7.1) параметры эквивалентного асинхронного двигателя, представляющего нагрузку:

$$z_{нагр.} = r_{нагр.} + j \cdot x_{нагр.} = \frac{S_б}{S_{нагр.}} \cdot \left(cos\varphi_{нагр.} + j \cdot sin\varphi_{нагр.}\right) =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2^2 + 1{,}344^2}} \cdot \left(0{,}83 + j \cdot 0{,}558\right) = 0{,}344 + j \cdot 0{,}232$$

.

Случай 1 – выключатель *Q3* включен. Напряжение на шинах нагрузки неизменно: $U_{íàãð.} = U_{ñ} = 1 = const$. Определим по аналогии с (7.4) и (7.5) критические скольжение и напряжение на зажимах эквивалентного асинхронного двигателя

$$R_2 = r_{нагр.} \cdot s_0 = 0{,}344 \cdot 0{,}03 = 0{,}01;$$

$$s_{кр.U} = \frac{R_2}{x_{нагр.}} = \frac{0{,}01}{0{,}232} = 0{,}044;$$

$$U_{нагр.кр.} = \sqrt{2 \cdot P_0 \cdot x_{нагр.}} = \sqrt{2 \cdot 2{,}0 \cdot 0{,}232} = 0{,}963.$$

Максимальная мощность нагрузки, которую двигатель может вращать без нарушения его устойчивой работы [5]:

$$P_{max} = \frac{\left(U_{нагр.}\right)^2}{2 \cdot x_{нагр.}} = \frac{1}{2 \cdot 0{,}232} = 2{,}155.$$

Коэффициент запаса устойчивости по мощности

$$k_{зап.P} = \frac{P_{max} - P_0}{P_{max}} \cdot 100\% = \frac{2{,}155 - 2{,}0}{2{,}155} \cdot 100\% = 7{,}19\%.$$

Коэффициент запаса устойчивости по скольжению

$$k_{зап.s} = \frac{s_{кр.} - s_0}{s_0} \cdot 100\% = \frac{0{,}044 - 0{,}03}{0{,}03} \cdot 100\% = 46{,}7\%.$$

Случай 2 – выключатель *Q3* отключен, АРВ на генераторе отсутствует.
Суммарное сопротивление от генератора до двигателя

$$x_{\Sigma.1} = x_{Гэкв.1} + x_{сист.} + x_{нагр.} = 0{,}4 + 0{,}15 + 0{,}232 = 0{,}782.$$

Критическое скольжение

$$s_{кр.E.1} = \frac{R_2}{x_{\Sigma.1}} = \frac{0{,}01}{0{,}782} = 0{,}013 < s_0 = 0{,}03.$$

Коэффициент запаса устойчивости по скольжению

$$k_{зап.s.1} = \frac{s_{кр.E.1} - s_0}{s_0} \cdot 100\% = \frac{0{,}013 - 0{,}03}{0{,}03} \cdot 100\% = -56{,}7\%.$$

Из полученных данных видно, что эквивалентный асинхронный двигатель в данном случае неустойчив. До отключения выключателя *Q3* двигатель работал устойчиво со скольжением 0,03; при внезапном отключении выключателя *Q3* и отсутствии АРВ на

генераторе работа двигателя со скольжением 0,03 оказалась правее $s_{кр.Е.1}$, развивается процесс опрокидывания двигателя.

Рассчитаем критическую э.д.с. по (7.5):

$$E_{Г.кр.1} = \sqrt{2 \cdot P_0 \cdot x_{\Sigma.1}} = \sqrt{2 \cdot 2,0 \cdot 0,782} = 1,769$$

и по (7.6) – соответствующее ей критическое напряжение на шинах нагрузки

$$U_{нагр.кр.1} = \sqrt{\left(E_{Г.кр.1} - \frac{Q_0 \cdot \left(x_{Г.экв.1} + x_{сист.}\right)}{E_{Г.кр.1}}\right)^2 + \left(\frac{P_0 \cdot \left(x_{Г.экв.1} + x_{сист.}\right)}{E_{Г.кр.1}}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1,769 - \frac{1,344 \cdot (0,4 + 0,15)}{1,769}\right)^2 + \left(\frac{2,0 \cdot (0,4 + 0,15)}{1,769}\right)^2} = 1,487 .$$

Определяем по (7.7) запас статической устойчивости нагрузки по напряжению

$$k_{зап.U.1} = \frac{U_{нагр.0} - U_{нагр.кр.1}}{U_{нагр.0}} \cdot 100\% = \frac{1 - 1,487}{1} \cdot 100\% = -48,7\% .$$

Эквивалентный асинхронный двигатель в данном случае <u>неустойчив и по второму критерию</u> – нет запаса устойчивости нагрузки по напряжению.

<u>*Случай 3*</u> – выключатель *Q3* отключен, на генераторе – АРВ ПД.

Суммарное сопротивление от генератора до двигателя

$$x_{\Sigma.2} = x_{Гэкв.2} + x_{сист.} + x_{нагр.} = 0,07 + 0,15 + 0,232 = 0,452 .$$

Критическое скольжение

$$s_{кр.Е.2} = \frac{R_2}{x_{\Sigma.2}} = \frac{0,01}{0,452} = 0,022 < s_0 = 0,03$$

Коэффициент запаса устойчивости по скольжению

$$k_{зап.s.2} = \frac{s_{кр.Е.2} - s_0}{s_0} \cdot 100\% = \frac{0,022 - 0,03}{0,03} \cdot 100\% = -26,7\% .$$

Эквивалентный асинхронный двигатель в и данном случае неустойчив <u>по первому критерию</u> – нет запаса устойчивости по скольжению.

Рассчитаем критическую э.д.с. по (7.5):

$$E_{Г.кр.2} = \sqrt{2 \cdot P_0 \cdot x_{\Sigma.2}} = \sqrt{2 \cdot 2,0 \cdot 0,452} = 1,345$$

и по (7.6) – соответствующее ей критическое напряжение на шинах нагрузки

$$U_{нагр.кр.2}=\sqrt{\left(E_{Г.кр.2}-\frac{Q_0\cdot\left(x_{Г.экв.2}+x_{сист.}\right)}{E_{Г.кр.2}}\right)^2+\left(\frac{P_0\cdot\left(x_{Г.экв.2}+x_{сист.}\right)}{E_{Г.кр.2}}\right)^2}=$$

$$=\sqrt{\left(1{,}345-\frac{1{,}344\cdot(0{,}07+0{,}15)}{1{,}345}\right)^2+\left(\frac{2{,}0\cdot(0{,}07+0{,}15)}{1{,}345}\right)^2}=1{,}172\,.$$

Определяем по (7.7) запас статической устойчивости нагрузки по напряжению

$$k_{зап.U.2}=\frac{U_{нагр.0}-U_{нагр.кр.2}}{U_{нагр.0}}\cdot 100\%=\frac{1-1{,}172}{1}\cdot 100\%=-17{,}2\%\,.$$

Эквивалентный асинхронный двигатель и в данном случае – при наличии на генераторе АРВ ПД – <u>неустойчив по второму критерию</u> – нет запаса устойчивости нагрузки по напряжению.

<u>*Случай 4*</u> – выключатель *Q3* отключен, на генераторе – АРВ СД.

Суммарное сопротивление от генератора до двигателя

$$x_{\Sigma.3}=x_{Гэкв.3}+x_{сист.}+x_{нагр.}=0+0{,}15+0{,}232=0{,}382\,.$$

Критическое скольжение

$$s_{кр.E.3}=\frac{R_2}{x_{\Sigma.3}}=\frac{0{,}01}{0{,}382}=0{,}026<s_0=0{,}03\,.$$

Коэффициент запаса устойчивости по скольжению

$$k_{зап.s.3}=\frac{s_{кр.E.3}-s_0}{s_0}\cdot 100\%=\frac{0{,}026-0{,}03}{0{,}03}\cdot 100\%=-13{,}3\%\,.$$

Эквивалентный асинхронный двигатель в и данном случае неустойчив <u>по первому критерию</u> – нет запаса устойчивости по скольжению.

Рассчитаем критическую э.д.с. по (7.5):

$$E_{Г.кр.3}=\sqrt{2\cdot P_0\cdot x_{\Sigma.3}}=\sqrt{2\cdot 2{,}0\cdot 0{,}382}=1{,}236$$

и по (7.6) – соответствующее ей критическое напряжение на шинах нагрузки

$$U_{нагр.кр.3}=\sqrt{\left(E_{Г.кр.3}-\frac{Q_0\cdot\left(x_{Г.экв.3}+x_{сист.}\right)}{E_{Г.кр.3}}\right)^2+\left(\frac{P_0\cdot\left(x_{Г.экв.3}+x_{сист.}\right)}{E_{Г.кр.3}}\right)^2}=$$

$$=\sqrt{\left(1{,}236-\frac{1{,}344\cdot(0+0{,}15)}{1{,}236}\right)^2+\left(\frac{2{,}0\cdot(0+0{,}15)}{1{,}236}\right)^2}=1{,}10\,.$$

Определяем по (7.7) запас статической устойчивости нагрузки по напряжению

$$k_{зап.U.3}=\frac{U_{нагр.0}-U_{нагр.кр.3}}{U_{нагр.0}}\cdot 100\%=\frac{1-1{,}10}{1}\cdot 100\%=-10{,}0\%\,.$$

Эквивалентный асинхронный двигатель и в случае наличия на генераторе АРВ СД неустойчив и по второму критерию – нет запаса устойчивости нагрузки по напряжению.

Устойчивая работа узла нагрузки необязательно должна нарушаться при потере связи с ближайшим источником питания. В зависимости от удаленности других источников и работе на генераторах этих источников соответствующих систем АРВ вполне возможно сохранение устойчивой работы нагрузки. Подтверждением этому служат полученные результаты – при совершенствовании систем АРВ коэффициенты запаса статической устойчивости (в рассмотренном примере - отрицательные) изменяются в сторону уменьшения.

При сдаче зачета необходимо уметь давать пояснения по существу рассмотренного практического занятия, а также показать знание предмета в объеме программы.

Контрольные вопросы:

1. *Дать понятие статической устойчивости электрической системы.*
2. *Как меняете запас статической устойчивости асинхронного двигателя при увеличении мощности питающего его генератора?*
3. *Что такое «критическое скольжение» эквивалентного асинхронного двигателя?*
4. *Что такое АРВ ПД? АРВ СД?*

8. ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПЕРЕРЫВА ПИТАНИЯ НА ШИНАХ НАГРУЗКИ ПО УСЛОВИЯМ САМОЗАПУСКА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ [5, 6]

Цель практического занятия: Условия работы узла нагрузки могут значительно измениться, если по каким-либо причинам будет потеряна связь с одним из источников питания, либо из-за короткого замыкания на одном из присоединений произойдет значительное снижение напряжения на шинах нагрузки. После устранения возмущения начинается процесс самозапуска электродвигателей узла нагрузки..

Цель работы – освоить методику оценки условий самозапуска наиболее ответственных электродвигателей, входящих в состав узла нагрузки, в подобных режимах.

Порядок проведения практического занятия: В аудитории выполняется подробный разбор теоретической части занятия и приведенного примера.

Теоретическая часть. При расчетах динамической устойчивости эквивалентного двигателя не учитываются электромагнитные переходные процессы в обмотках двигателей. Изменение скольжения, обусловленное изменением режима, определяется численным интегрированием уравнения движения асинхронного электродвигателя:

$$T_j \cdot \frac{ds}{dt} = M_{ном.} - M_{(s)}, \qquad (8.1)$$

где T_j – постоянная инерции, приведенная к номинальной мощности двигателя, [c];

$M_{ном.}$ – номинальный механический момент сопротивления, [о.е.];

$M_{(s)}$ – электромагнитный момент двигателя, [о.е.], определяемый по формуле

$$M_{(s)} = \frac{2 \cdot k_{max}}{\frac{s}{s_{кр.1}} + \frac{s_{кр.1}}{s}} \cdot \left(\frac{U_{дв.}}{U_{ном.}} \right)^2, \qquad (8.2)$$

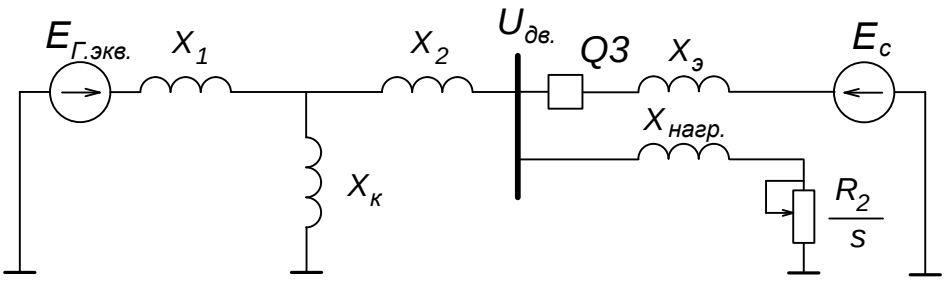
где $k_{max} = \frac{M_{max.}}{M_{ном.}} \cong \frac{P_{max.}}{P_{ном.}}$; $P_{max.} = \frac{U^2_{ном.}}{2 \cdot x_{нагр.}}$; $s_{кр.1} = \frac{R_2}{x_{нагр.}}$.

В формулы (8.1) и (8.2) рекомендуется все величины подставлять в относительных единицах при номинальной мощности двигателя.

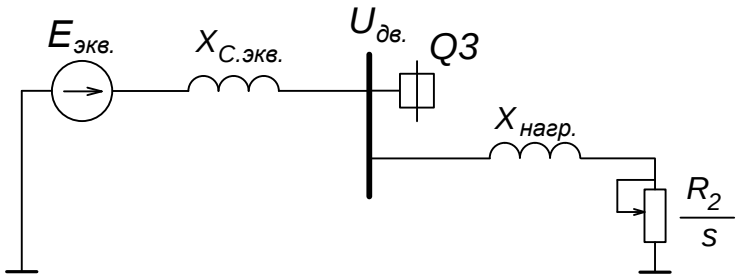
В случае к.з. на двигателе напряжение $U_{дв.}$ уменьшается и для его определения необходимо рассматривать схему замещения, показанную на рис. 8.1, *а* для общего случая. С помощью эквивалентных преобразований расчетная схема приводится к виду, изображенному на рис. 8.1, *б*.

Напряжение $U_{дв.}$ на зажимах двигателя в зависимости от скольжения определится по формуле

$$U_{дв.} = I \cdot z_{дв.} = \frac{E_{экв.} \cdot \sqrt{\left(x_{нагр.}\right)^2 + \left(\frac{R_2}{s}\right)^2}}{\sqrt{\left(x_{С.экв.} + x_{нагр.}\right)^2 + \left(\frac{R_2}{s}\right)^2}}. \qquad (8.3)$$



а)



б)

Рис. 8.1. Схема замещения для оценки динамической устойчивости асинхронного двигателя: *а* – общий случай; *б* – при отключении системы неограниченной мощности.

Для подготовки к численному решению дифференциальное уравнение (8.1) запишем в виде

$$\frac{ds}{dt} = \frac{M_{ном.}}{T_j} - \frac{M_{(s)}}{T_j} = f_2 \qquad (8.4)$$

при начальных условиях

$$s_{(0)} = s_0 .$$

На каждом шаге интегрирования величина f_2 определяется с использованием выражений (8.2) и (8.3).

При отключении к.з. напряжение на шинах двигателя восстанавливается до значения, близкого к номинальному. Если при продолжении процесса численного интегрирования с $U_{дв.} = U_{ном.}$ скольжение продолжает расти, то устойчивость не сохраняется.

Уравнение (8.4) может решаться вручную, например, методом Эйлера. При этом приращение скольжения за интервал времени определяется по формуле

$$\Delta s_{(n+1)} = f_{2(n)} \cdot \Delta t . \qquad (8.5)$$

Чтобы определить предельное время перерыва электроснабжения (допускаемое время из условий успешного самозапуска), надо определить время достижения предельного скольжения $s_{пр.}$, которое при $M_{ном.} = const$ вычисляется по выражению (8.2) при $U_{дв.} = U_{ном.}$ и $M_{(s)} = M_{ном.}$ т.е.

$$M_{ном.} = \frac{2 \cdot k_{max}}{\dfrac{s_{пр.}}{s_{кр.1}} + \dfrac{s_{кр.1}}{s_{пр.}}} \cong P_{ном.} . \qquad (8.6)$$

При этом решение дифференциального уравнения (8.1) упрощается (т.к. $M_{(s)} = 0$) и сводится к виду

$$dt = \frac{T_j}{P_{ном.}} ds ,$$

откуда

$$t_{пр.} = \frac{T_j}{P_{ном.}} \cdot \int_{s_0}^{s_{пр.}} ds = \frac{T_j}{P_{ном.}} \cdot \left(s_{пр.} - s_0 \right). \qquad (8.7)$$

Пример 8.1. Для простейшей электроэнергетической системы (ЭЭС), рассмотренной в примере 7.1, при питании нагрузки от системы неограниченной мощности (подпитка шин $U_{дв.} = U_{нагр.}$ со стороны станции отсутствует) определить предельное время перерыва электроснабжения при отключении выключателя *Q3*.

Решение. Предельное скольжение $s_{пр.}$ определим из уравнения (8.6). В примере 7.1 были получены следующие величины, необходимые для расчета:

– максимальная мощность нагрузки, которую двигатель может вращать без нарушения его устойчивой работы

$$P_{max} = \frac{\left(U_{нагр.}\right)^2}{2 \cdot x_{нагр.}} = \frac{1}{2 \cdot 0,232} = 2,155;$$

– критическое скольжение

$$R_2 = r_{нагр.} \cdot s_0 = 0,344 \cdot 0,03 = 0,01;$$

$$s_{кр.1} = \frac{R_2}{x_{нагр.}} = \frac{0,01}{0,232} = 0,044.$$

Определяем $k_{max} = \frac{M_{max.}}{M_{ном.}} \cong \frac{P_{max.}}{P_{ном.}} = \frac{2,155}{2,0} = 1,077$ и подставляем все значения в (8.6):

$$M_{ном.} = \frac{2 \cdot k_{max}}{\frac{s_{пр.}}{s_{кр.1}} + \frac{s_{кр.1}}{s_{пр.}}} \cong P_{ном.}, \text{ т.е. } \frac{2 \cdot 1,077}{\frac{s_{пр.}}{0,044} + \frac{0,044}{s_{пр.}}} \cong 2,0.$$

После преобразований получим квадратное уравнение:

$$\left(s_{пр.}\right)^2 - 0,0474 \cdot s_{пр.} + 0,00194 = 0,$$

$$s_{пр.1,2} = \frac{0,0474 \pm \sqrt{(0,0474)^2 - 4 \cdot 0,00194}}{2} = \frac{0,0474 \pm \sqrt{-0,00529}}{2}.$$

Подкоренное выражение оказалось отрицательным. Это означает, что при перерыве электроснабжения самозапуск эквивалентного двигателя не обеспечивается.

При сдаче зачета необходимо уметь давать пояснения по существу рассмотренного практического занятия, а также показать знание предмета в объеме программы.

Контрольные вопросы:

1. *Что такое «самозапуск электродвигателя»?*
2. *В чем отличие режимов пуска и самозапуска?*
3. *При каких условиях может произойти «опрокидывание» электродвигателя?*

4. *Как обеспечить самозапуск наиболее ответственных двигателей узла нагрузки?*
5. *Что такое «защита минимального напряжения»?*

9. РАСЧЕТ САМОЗАПУСКА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ [7]

Цель практического занятия: Для повышения бесперебойной работы основных механизмов узла нагрузки, либо основных агрегатов тепловой электростанции при ненормальных электрических режимах в основной сети или в сети собственных нужд необходимо расчетным или экспериментальным путем проверить условия обеспечения режимов самозапуска электродвигателей.

Цель работы – освоить методику оценки условий самозапуска наиболее ответственных электродвигателей, входящих в состав узла нагрузки, в подобных режимах.

Порядок проведения практического занятия: В аудитории выполняется подробный разбор теоретической части занятия и приведенного примера.

Теоретическая часть. Для проверки условий обеспечения режима самозапуска должны быть определены:

– возможные в эксплуатации перерывы питания в схеме узла нагрузки либо собственных нужд (с.н.) станции;

– величина начального (остаточного) напряжения на шинах узла нагрузки (с.н.) для допустимых перерывов питания и достаточность этой величины для успешного разворота основных механизмов в заданное время;

– изменение параметров технологического режима основных агрегатов в процессе самозапуска двигателей узла нагрузки (с.н.) и проведение согласования уставок релейных и технологических защит с учетом этих изменений.

Наиболее точный расчет самозапуска может быть произведен графоаналитическим методом. Этот метод на основании данных пусковых характеристик агрегатов с.н. позволяет путем громоздких подсчетов методом последовательных интервалов определить суммарный ток самозапуска двигателей, напряжение на шинах собственных нужд в начальный момент самозапуска и продолжительность самозапуска как отдельных электродвигателей, так и всех самозапускающихся электродвигателей.

Но для предварительной оценки достаточным критерием успешности самозапуска является величина начального напряжения при самозапуске.

Величина эта может быть определена с необходимой степенью точности при помощи метода эквивалентного двигателя. Метод основан на многочисленных экспериментальных данных самозапуска типовой группы двигателей, подключенных к секции с.н. тепловых электростанций, которые позволили определить относительную величину суммарного пускового тока

самозапуска (по отношению к суммарному току самозапуска для пуска двигателей из заторможенного состояния) в зависимости от продолжительности перерыва питания:

$$k_i = I_t / I_{пуск.} = f(t), \qquad (9.1)$$

где I_t – суммарный ток самозапуска двигателей секции при данном перерыве питания;

$I_{пуск.}$ – суммарный ток самозапуска двигателей секции при пуске двигателей из заторможенного состояния.

Эта зависимость изображена на рис. 9.1.

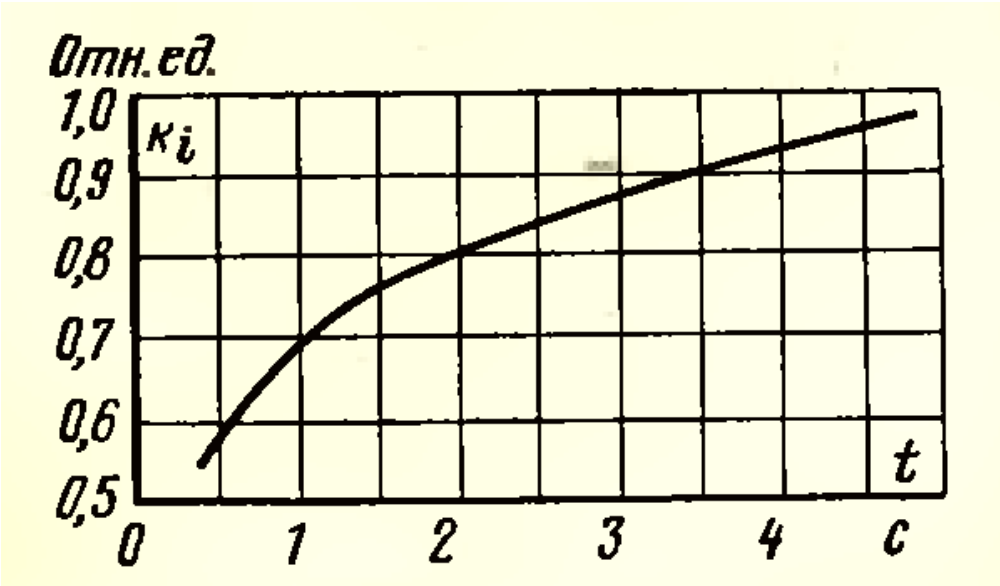


Рис. 9.1. Зависимость кратности тока двигателей с. н. при самозапуске (по сравнению с его значением для заторможенных двигателей) от продолжительности перерыва питания при действии АВР [7].

Как видно из рис. 9.1, в пределах допустимых в эксплуатации перерывов питания 0,5–3,0с величина суммарного тока самозапуска двигателей увеличивается от 0,55 до 0,87 полного суммарного пускового тока заторможенных двигателей ($I_t = \infty$), приближаясь к его полной величине при перерывах питания более 5,0 с.

Начальное (остаточное) напряжение на шинах с.н. при подаче напряжения <u>после перерыва питания</u> группы электродвигателей от резервного ненагруженного источника, отн. ед.,

$$U^*_{ост.} = \frac{U^*_c}{1 + \sqrt{3} \cdot x_\Sigma \cdot k_i \cdot \sum \left(k_n \cdot I_{ном.дв.} / U_{ном.дв.} \right)}, \qquad (9.2)$$

где $U_c^* = 1,05 \div 1,1$ – напряжение х. х. источника питания, отн. ед.;

k_n – номинальная кратность пускового тока двигателя, отн. ед.;

k_i – коэффициент, учитывающий уменьшение кратности пускового тока двигателей при самозапуске по сравнению с его значением для заторможенных двигателей (рис. 9.1);

x_Σ – суммарное сопротивление цепи питания (системы, трансформатора, реактора, линии, шин).

Пример 9.1. Определим величину остаточного напряжения при самозапуске двигателей с. н. блочного агрегата мощностью 200 МВт после перерыва питания 2,0 с.

В самозапуске участвуют двигатели мельничного вентилятора (МВ) питательного насоса (ПЭН), дымососа (Д), дутьевого вентилятора (ДВ), резервного возбудителя (РВ), вентилятора горячего дутья (ВГД), конденсатного насоса (КН), циркуляционного насоса (ЦН). Данные двигателей приведены в табл. 9.1.

Таблица 9.1.

Параметры двигателей

Параметр	Двигатели							
	МВ	ПЭН	Д	ДВ	РВ	ВГД	КН	ЦН
$I_{ном.\ дв}$	90	450	204	99	156	32	29,4	215
Кратность пускового тока, $k_п$	5,4	7,0	5,5	10,3	10,5	4,6	5,8	5,4

Параметры резервного трансформатора: $S = 15750$ кВА; $u_k = 10,3\%$, $I_{ном.тр.} = 1445$ А; $U_{ном.тр.} = 6800$ В; напряжение х.х. резервных шин $U_c = 6300$ В. Сопротивление внешней цепи $x_c = 0,05$.

1. Индуктивное сопротивление цепи питания:

$$x = x_{тр} + x_c = 0,26 + 0,05 = 0,31 \text{ Ом},$$

где

$$x_{тр} = \frac{u_k \cdot U_{ном.тр.}}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot I_{ном.тр.}} = \frac{10,3}{100} \cdot \frac{6300}{1,73 \cdot 1445} = 0,26 \text{ Ом},$$

2. Суммарный пусковой ток двигателей в заторможенном состоянии (при одном двигателе ПЭН):

$$\sum k_n \cdot I_{ном.} = 90 \cdot 5,4 + 450 \cdot 7 + 204 \cdot 5,5 + 99 \cdot 10,3 + 156 \cdot 10,5 +$$

$$+32 \cdot 4,6 + 29,4 \cdot 5,8 + 215 \cdot 5,4 = 8894 \text{ А.}$$

3. Остаточное напряжение на шинах с.н. при самозапуске от ненагруженного трансформатора после перерыва питания 2,0с ($k_n = 0,81$) [7]:

$$U^*_{ост.} = \frac{U^*_c}{1 + \sqrt{3} \cdot x_\Sigma \cdot k_i \cdot \sum \left(k_n \cdot I_{ном.дв.} / U_{ном.дв.} \right)} =$$

$$= \frac{1,05}{1 + \dfrac{1,73 \cdot 0,31 \cdot 0,81 \cdot 8894}{6000}} = 0,650.$$

Экспериментальные данные для этого случая дали величину $U^*_{ост.} = 0,64$, а продолжительность самозапуска 7,2 с, т. е. самозапуск прошел успешно.

При сдаче зачета необходимо уметь давать пояснения по существу рассмотренного практического занятия, а также показать знание предмета в объеме программы.

Контрольные вопросы:

1. *Как влияют друг на друга двигатели разных механизмов при групповом самозапуске?*
2. *При каких условиях может произойти «опрокидывание» электродвигателя?*
3. *Как обеспечить самозапуск наиболее ответственных двигателей узла нагрузки либо секции собственных нужд электрической станции?*
4. *Что такое САОН?*

10. ИЗУЧЕНИЕ СХЕМ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ ВВОДА РЕЗЕРВА [8]

Цель практического занятия: Автоматика ввода резерва позволяет минимизировать перерыв электроснабжения потребителей и, тем самым, ограничить, или не допустить вовсе возможный ущерб от недоотпуска электроэнергии.

Цель работы – разобраться, какие требования предъявляются к схемам АВР, как эти требования реализуются в различных схемах и научиться читать схемы устройств автоматики.

Порядок проведения практического занятия: В аудитории выполняется подробный разбор теоретической части практического занятия и схемы АВР силового трансформатора. Остальные схемы предназначены для самостоятельного изучения.

Теоретическая часть. Назначение АВР – быстрое восстановление электроснабжения потребителей при отключении рабочего источника питания или находящегося в работе оборудования путем автоматического включения резервного источника питания или резервного оборудования (рис. 10.1).

Пусковые органы минимального напряжения должны срабатывать только при полном исчезновении напряжения и не должны приходить в действие при понижении напряжения, вызванном удаленными КЗ или самозапуском двигателей. Например, на рис. 10.1: пусковые органы могут работать при отключении выключателей *Q1* или *Q2*, либо при КЗ в точках *К4*, *К5* или *К6*. Если же повреждение – в точках *К1*, *К2* или *К3*, устройство АВР не должно запускаться.

Для выполнения этого требования напряжение срабатывания реле минимального напряжения выбирается по следующим условиям:

$$U_{с.р.1} \le \frac{U_{ост.К3}}{k_н \cdot k_в \cdot n_{TV}}, \qquad (10.1)$$

$$U_{с.р.1} \le \frac{U_{с/зап.}}{k_н \cdot k_в \cdot n_{TV}}, \qquad (10.2)$$

где $U_{ост.К3}$ – наименьшее остаточное напряжение при трехфазном КЗ за реакторами (*К2*, *К3*) и за трансформатором (*К1*);

$U_{с/зап.}$ – наименьшее напряжение при самозапуске двигателей после отключения коротких замыканий;

$k_н = 1,2 \div 1,3$ – коэффициент надежности;

$k_в$ – коэффициент возврата реле, определяемый из справочников.

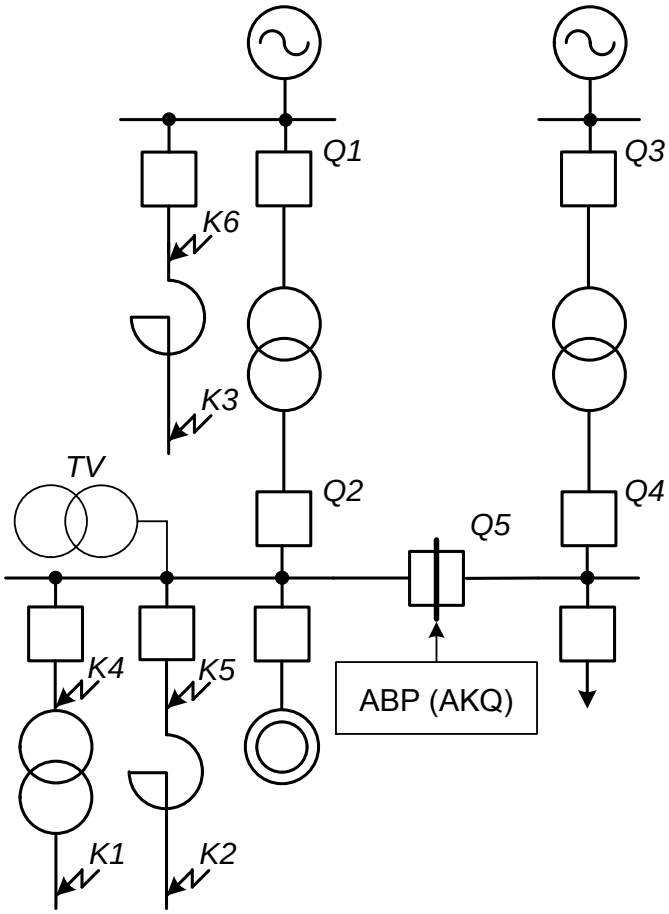


Рис. 10.1. Пример применения АВР.

За расчетное значение напряжения срабатывания реле принимается меньшее. В практических расчетах обычно условия (10.1) и (10.2) выполняются при

$$U_{с.р.1} = (0,25 - 0,4) \cdot U_{ном.}. \qquad (10.3)$$

Выдержка времени пускового органа должна быть на ступень селективности больше выдержек времени защит, повреждение в зоне действия которых может привести к пуску АВР. Такими зонами являются участки до реакторов (точки *К5*, *К6*) и до трансформатора (точка *К4*) на рис. 10.1. Следовательно:

$$t_{1AKQ} = t'_{р.з.макс} + \Delta t, \qquad (10.4)$$

$$t_{1AKQ} = t''_{р.з.макс} + \Delta t, \qquad (10.5)$$

где $t'_{р.з.макс}$ – максимальная выдержка времени защит присоединений, отходящих от шин высшего напряжения;

$t''_{р.з.макс}$ – максимальная выдержка времени защит присоединений, отходящих от шин низшего напряжения;

Δt – ступень селективности.

Более надежным вариантом пускового органа АВР является использование минимального реле напряжения и минимального реле тока, контакты которых включены последовательно. Ток срабатывания пускового органа минимального тока

$$I_{с.р.1} \le \frac{I_{мин.нагр.}}{k''_н \cdot n_{TA}}, \qquad (10.6)$$

где $I_{мин.нагр.}$ – минимальный ток нагрузки трансформатора;

$k''_н = 1,5$ – коэффициент надежности.

Выдержка времени пускового органа минимального напряжения и тока

$$t_{1AKQ} = t'_{р.з.макс} + \Delta t. \qquad (10.7)$$

АВР теряет смысл, если отсутствует напряжение на резервном источнике.

Уставка реле контроля напряжения на резервном источнике питания:

$$U_{с.р.2} \ge \frac{U_{мин.раб.}}{k'_н \cdot k_в \cdot n_{TV}}, \qquad (10.8)$$

где $U_{мин.раб.}$ – минимальное рабочее напряжение;

$k'_н = 1,1 \div 1,2$ – коэффициент надежности.

Выдержка времени реле однократного включения (РОВ) должна с некоторым запасом превышать время включения выключателя резервного источника питания (на рис. 10.1 – *Q5*):

$$t_{РОВ} = t_{вкл.Q} + t_{зап.}, \qquad (10.9)$$

где $t_{зап.} = 0,2 \div 0,3$ с – время запаса;

$t_{вкл.Q}$ – время включения резервного выключателя (определяется по справочникам).

Варианты схем АВР

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ РЕЗЕРВНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Для правильной работы схемы АВР у основного трансформатора должны быть включены все разъединители и выключатели, а у резервного – только разъединители *QS3* и *QS4* – рис. 10.2а.

При отключении по любой причине выключателя *Q1* его вспомогательный контакт *Q1.1* разрывает цепь обмотки промежуточного реле *KL1* – рис. 10.2б. В результате якорь реле *KL1*, подтянутый при включенном положении выключателя, при снятии напряжения отпадает с некоторой выдержкой времени и переключает контакты реле.

Второй вспомогательный контакт *Q1.2* выключателя *Q1*, замкнувшись, подает плюс через еще замкнутый контакт *KL1.1* на обмотку промежуточного реле *KL2*, которое своими контактами *KL2.1* и *KL2.2* производит включение выключателей *Q3* и *Q4* резервного трансформатора, воздействуя на катушки включения *YAC3* и *YAC4*. По истечении установленной выдержки времени реле *KL1* размыкает контакты и разрывает цепь обмотки промежуточного реле *KL2*.

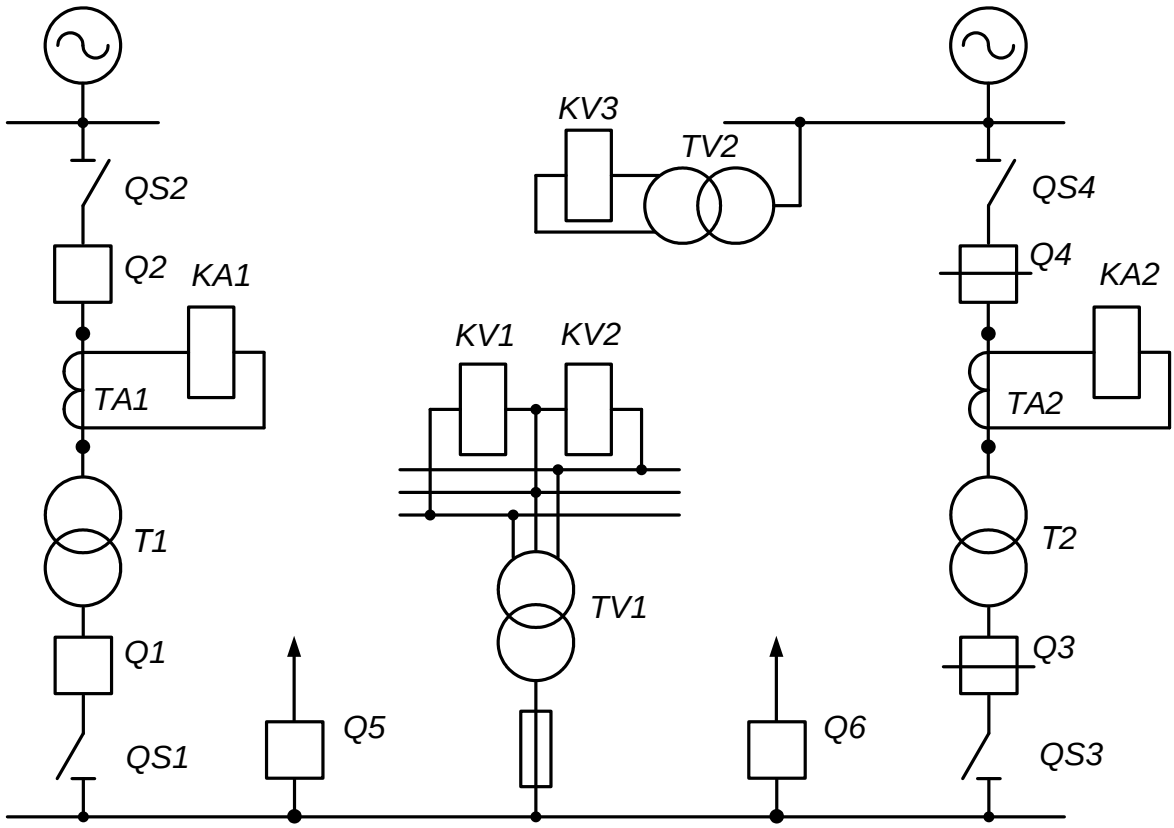


Рис. 10.2а. АВР резервного трансформатора (поясняющая схема)

Если резервный трансформатор будет включен действием АВР на неустранившееся КЗ и отключится релейной защитой, то его повторного включения не произойдет. Таким образом, реле *KL1* обеспечивает однократность действия АВР и поэтому называется реле однократности включения (РОВ). Реле *KL1* вновь замкнет свои контакты и подготовит схему АВР к новому действию лишь после того, как будет восстановлена нормальная схема питания подстанции и включен выключатель *Q1*. Выдержка времени на размыкание контакта реле *KL1* должна быть больше времени включения выключателей *Q3* и *Q4*, для того чтобы они успели надежно включиться.

С целью обеспечения действия АВР при отключении выключателя *Q2* от его вспомогательного контакта *Q2.1* подается импульс на катушку отключения *YAT1* выключателя *Q1*. После отключения выключателя *Q1* АВР запускается и действует, как рассмотрено выше.

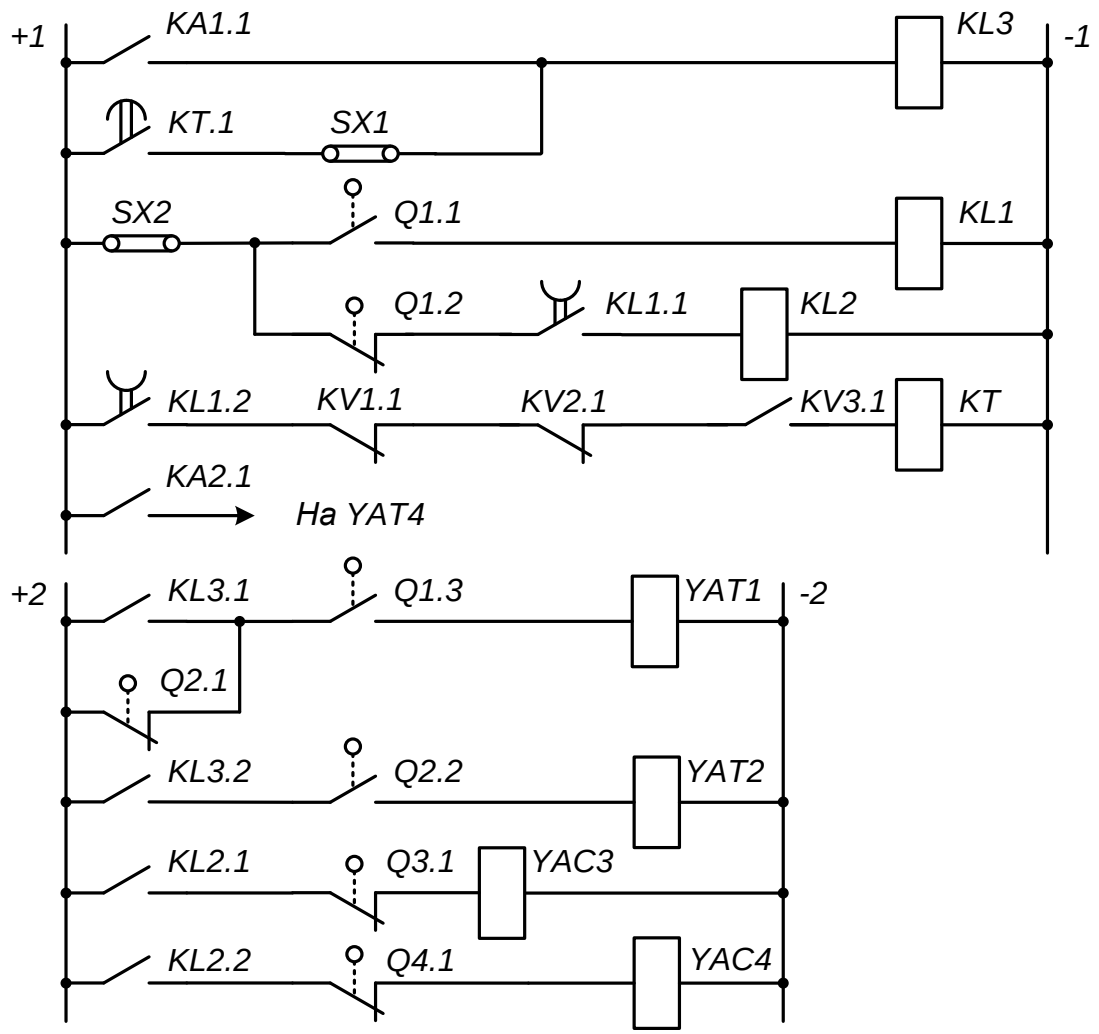


Рис. 10.2б. АВР резервного трансформатора (оперативные цепи)

Кроме рассмотренных случаев отключения рабочего трансформатора потребители также потеряют питание, если по какой-либо причине останутся без напряжения шины высшего напряжения основного источника питания. По уже описанному алгоритму схема АВР при этом не подействует, так как оба выключателя рабочего трансформатора остались включенными. Для того чтобы обеспечить действие АВР и в этом случае, предусмотрен специальный пусковой орган минимального напряжения, включающий в себя реле *KV1, KV2, KT* и *KL3.*

При исчезновении напряжения на шинах источника питания и, следовательно, на шинах потребителей, реле минимального напряжения, подключенные к трансформатору напряжения *TV1,* замкнут свои контакты и подадут плюс оперативного тока на обмотку реле времени *KT* через контакт реле *KV3.* Реле *KT* при этом запустится и по истечении установленной выдержки времени подаст плюс на обмотку выходного промежуточного реле *KL3,* которое производит отключение выключателей *Q1* и *Q2* рабочего трансформатора. После отключения выключателя *Q1* АВР действует, как рассмотрено выше.

Реле напряжения *KV3* предусмотрено для того, чтобы предотвратить отключение трансформатора *T1* от пускового органа минимального напряжения в случае отсутствия питания на шинах высшего напряжения резервного трансформатора *T2,* когда действие АВР будет заведомо бесполезным. Реле напряжения *KV3,* подключенное к трансформатору напряжения *TV2* шин резерва, при отсутствии напряжения размыкает свой контакт и разрывает цепь от контактов реле *KV1* и *KV2* к обмотке реле времени *KT.*

В схеме АВР предусмотрены две накладки: *SX1* – для отключения пускового органа минимального напряжения и *SX2* – для вывода из работы всей схемы АВР.

АВР ТРАНСФОРМАТОРОВ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ТЕПЛОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Секции собственных нужд (1-я, 2-я, 3-я секции) питаются от трех рабочих трансформаторов: *T1, T2, T3.* Резервный трансформатор *T4* нормально отключен и находится в автоматическом резерве – рис. 10.3а. При отключении рабочего трансформатора от АВР включается выключатель *Q42* и один из выключателей *Q13, Q23* или *Q33* – в зависимости от того, какой из трансформаторов отключился.

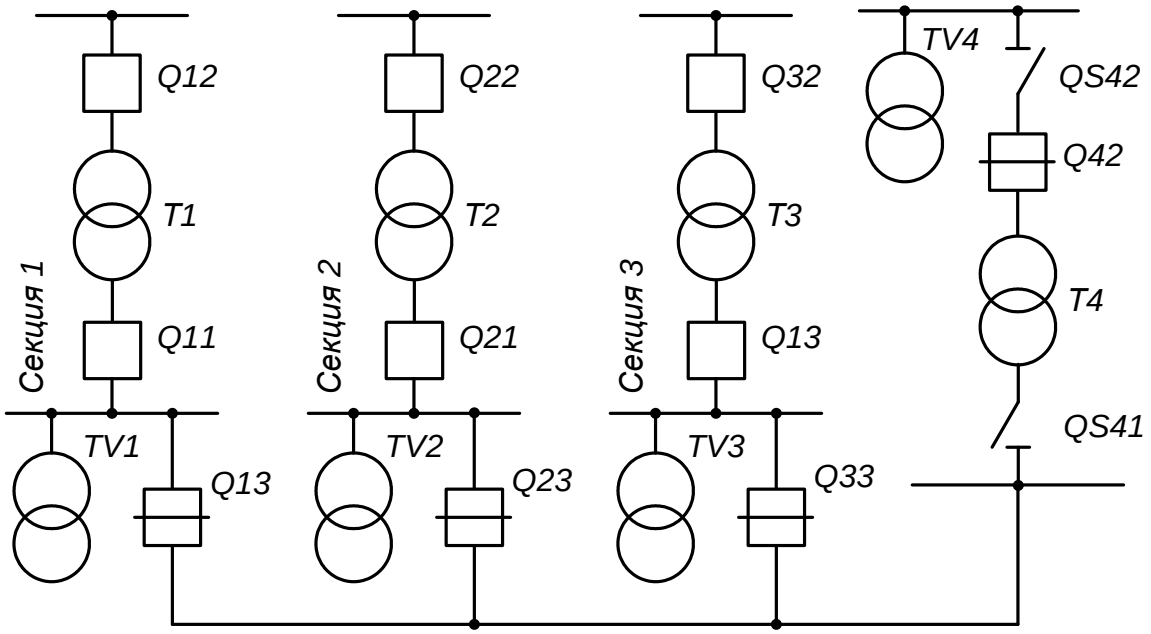


Рис. 10.3а. АВР трансформатора собственных нужд (поясняющая схема)

В отличие от схемы на рис. 10.2б, функцию реле однократности включения выполняет не специальное промежуточное реле (реле *KL1* на рис. 10.2б), а реле положения «Включено», например *KQC1* в схеме управления выключателя *Q11* (рис. 10.3б). При включенном выключателе *Q11* вспомогательный контакт *Q11.1* замкнут, реле *KQC1* обтекается током, его якорь притянут и контакты *KQC1.1* и *KQC1.2* замкнуты.

При отключении выключателя *Q11* размыкается его вспомогательный контакт *Q11.1* в цепи отключающей катушки YAT_{Q11} и замыкаются вспомогательные контакты *Q11.2* и *Q11.3.* Вспомогательный контакт *Q11.1* размыкает цепь обмотки реле *KQC1,* но, поскольку оно имеет замедление на отпадание, его контакты *KQC1.1* и *KQC1.2* размыкаются не сразу, а с выдержкой времени. Поэтому замкнувшиеся вспомогательные контакты *Q11.2* и *Q11.3* образуют цепи на включение выключателей *Q13* и *Q42* резервного трансформатора *T4* через еще замкнутые контакты реле *KQC1.*

При этом, поскольку при отключении любого из рабочих трансформаторов необходимо включить выключатель высшего напряжения резервного трансформатора *Q42,* цепь от вспомогательного контакта *Q11.3* параллельно с такими же цепями от вспомогательных контактов выключателей и контактов реле *KQC* выключателей *Q23* и *Q33* других рабочих трансформаторов *T2* и *T3* (эти цепи на рис. 10.3б не показаны) действует через соответствующие переключатели блокировки рабочих трансформаторов – *SA1, SA2, SA3* (на схеме рис. 10.3б показан только *SA1*) и резервного трансформатора

(*SA4*) на контактор включения *КМ* выключателя *Q42*. Второй вспомогательный контакт *Q11.2* действует через контакт *KQC1.1* и контакт *SA1.2* переключателя блокировки рабочего трансформатора *(SA1)* на включение выключателя *Q13*, благодаря чему обеспечивается подача напряжения на первую секцию собственных нужд от резервного трансформатора *Т4*.

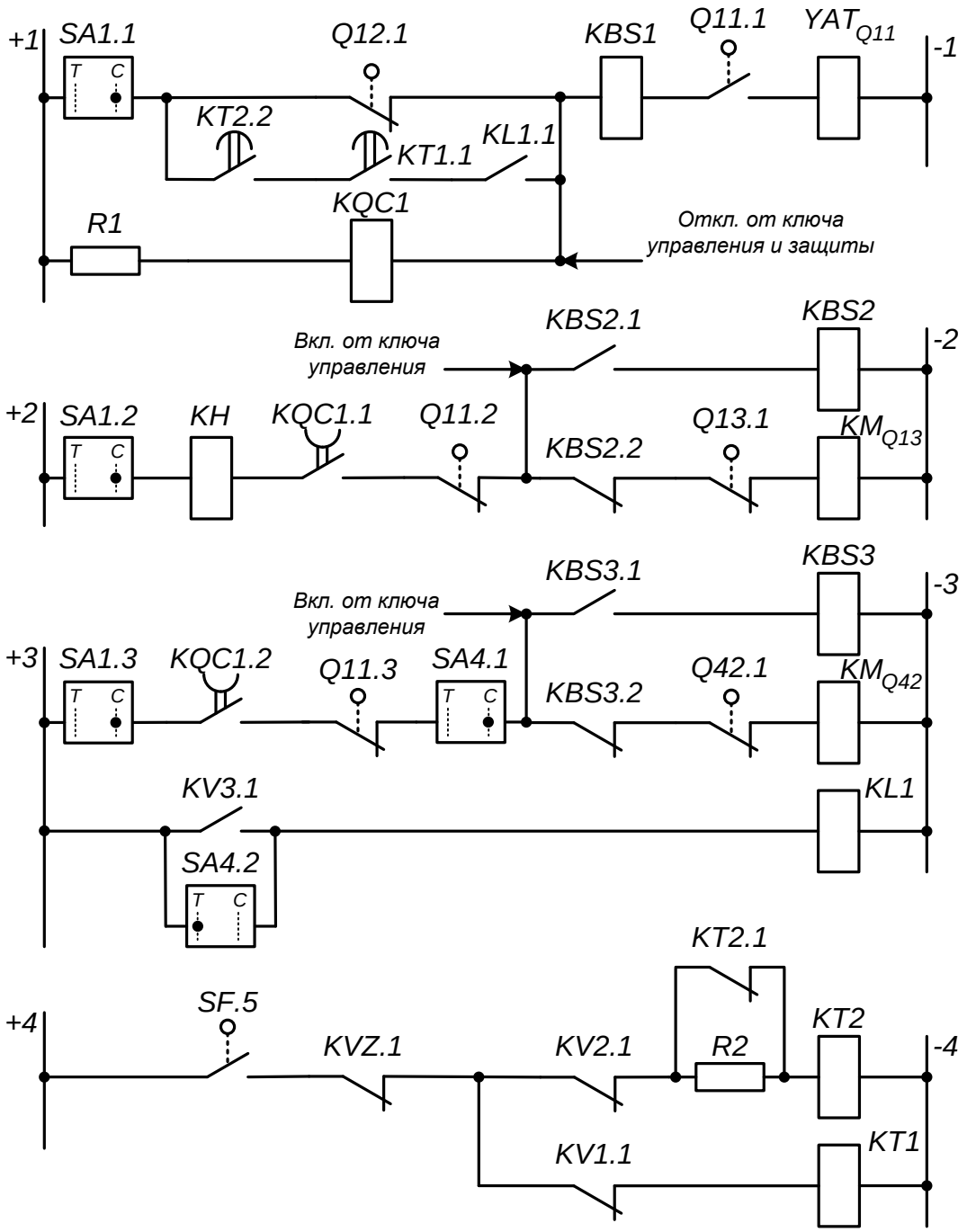


Рис. 10.3б. АВР трансформатора собственных нужд (цепи оперативного тока)

Для того чтобы обеспечить действие АВР при отключении выключателя *Q12* со стороны высшего напряжения рабочего трансформатора, в схеме предусмотрена подача импульса от вспомогательного контакта этого выключателя *Q12.1* на отключение выключателя *Q11*. После отключения выключателя *Q11* АВР работает, как рассмотрено выше. В цепи отключения выключателя *Q11* от вспомогательного контакта выключателя *Q12* введен контакт *SA1.1* переключателя *SA1*. При ремонте рабочего трансформатора переключатель *SA1* отключается и данная блокировка не действует, что позволяет свободно оперировать выключателями трансформатора *T1*.

Для осуществления пуска АВР при исчезновении напряжения на питающих шинах РУ собственных нужд, когда выключатели рабочего трансформатора остаются включенными, предусмотрен пусковой орган минимального напряжения – рис. 10.3в.

Аналогично схеме пускового органа минимального напряжения, приведенной на рис. 10.2б, для пуска схемы АВР в рассматриваемом случае необходимо срабатывание двух реле напряжения *(KV1* и *KV2* на рис. 10.3в) и реле *KT1* и *KT2*. В качестве дополнительных реле *KV2* и *KT2* используются реле первой ступени защиты минимального напряжения, предназначенной для отключения неответственных электродвигателей в режиме самозапуска. На реле *KV2* выполняется обычно уставка 70 В, и оно срабатывает одновременно с реле *KV1* при исчезновении напряжения на шинах 6 кВ, обеспечивая пуск схемы АВР. Для исключения ложного срабатывания пускового органа АВР и защиты минимального напряжения электродвигателей при отключении автоматического выключателя *SF*, установленного во вторичных цепях трансформатора напряжения, плюс на контакты реле напряжения подается через замыкающий контакт автомата *SF.5* (называемый иначе «блок-контакт автоматики» – БКА), замкнутый при включенном автоматическом выключателе.

Предусмотренные в схеме на рис. 10.3б блокировки не исключают возможности ложного срабатывания пускового органа в случае перегорания предохранителя в средней фазе на стороне высшего напряжения *TV1*, когда могут одновременно сработать оба реле напряжения *KV1* и *KV2*. Для предотвращения ложного срабатывания пускового органа АВР в этом случае плюс на схему подается через размыкающий контакт фильтр-реле напряжения обратной последовательности *KVZ* (типа РНФ-1М), установленного в схеме защиты минимального напряжения электродвигателей, питающихся от данной секции шин собственных нужд.

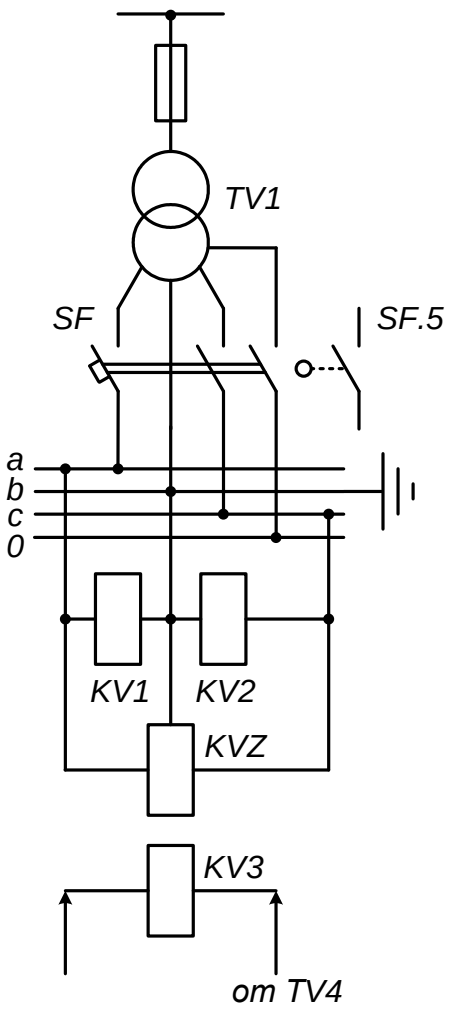


Рис. 10.3в. АВР трансформатора собственных нужд (цепи напряжения)

В цепи отключения выключателя трансформатора от пускового органа АВР включены замыкающие контакты реле *KL1,* замкнутые при наличии напряжения на резервном источнике питания. Промежуточное реле *KL1* приходит в действие от контактов реле максимального напряжения *KV3* и служит для размножения контактов последнего с целью использования их в цепях отключения других рабочих трансформаторов.

В случае вывода в ремонт резервного трансформатора *T4* АВР может остаться включенным. При этом резервирование обеспечивается от наименее загруженного рабочего трансформатора. При выводе в ремонт резервного трансформатора отключаются его разъединители *QS42* и *QS41* и на шины резервного питания подается напряжение, например, от трансформатора *T3* включением выключателя *Q33.* Переводом переключателя *SA4* в положение «*T*» («отключено») отключается действие АВР на включение выключателя *Q42* резервного трансформатора *T4* (контакт *SA4.1).* Контактом *SA4.2* этого переключателя шунтируется контакт реле напряжения *KV3* для того, чтобы контроль наличия напряжения на шинах резервного трансформатора не влиял

на работу пускового органа АВР. При выведенном из работы резервном трансформаторе отключение рабочих трансформаторов *T1* и *T2* резервируется автоматическим включением соответствующих выключателей – *Q13* или *Q23.* Отключение рабочего трансформатора *T3* не резервируется. Схема АВР для реактированных линий собственных нужд выполняется аналогично, при этом, однако, отсутствует цепь на включение выключателя резервной линии со стороны питания. Этот выключатель постоянно включен, так как в реакторе отсутствуют потери холостого хода.

АВР СЕКЦИОННОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ ПОДСТАНЦИИ С СИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ

На подстанциях высокого напряжения наряду с АВР трансформаторов, которые могут выполняться по схемам, аналогичным рассмотренным выше, применяются АВР секционных и шиносоединительных выключателей и АВР линий.

Схема АВР секционного выключателя, приведенная на рис. 10.4, отличается от рассмотренных выше некоторыми особенностями. Питание секций шин подстанции, к одной из которых подключен синхронный электродвигатель (СД) *M* большой мощности, производится от двух рабочих трансформаторов *T1* и *T2.* При отключении любого из них происходит автоматическое включение секционного выключателя *Q5.* Однократность действия АВР в схеме на рис. 10.4 обеспечивается так же, как и в схемах, рассмотренных выше, с помощью реле *KQC1* и *KQC3* (реле положения «Включено» в схеме управления соответствующими выключателями, катушка *KQC2* на рис. 10.4б не показана).

В случае отключения выключателя *Q1* трансформатора *T1*, питающего первую секцию, замыкается вспомогательный контакт этого выключателя *Q1.2* и через замкнутый в рабочем состоянии схемы контакт *KQC1.1* реле *KQC1* подает импульс на катушку включения YAC_{Q5} выключателя *Q5.*

Из-за наличия на второй секции синхронного двигателя *M* (или синхронного компенсатора) действие АВР при отключении выключателя *Q3* будет происходить по-другому. После отключения трансформатора *T2,* питающего вторую секцию, частота вращения синхронного электродвигателя (синхронного компенсатора) будет уменьшаться постепенно, вследствие чего при действии АВР он может быть включен несинхронно через трансформатор *T1*. Если толчок тока при несинхронном включении превышает величину, допустимую для синхронного электродвигателя (компенсатора) или трансформатора, синхронный электродвигатель (компенсатор) необходимо

предварительно отключить и лишь затем включить секционный выключатель. Отключение выключателя *Q6* синхронного электродвигателя (компенсатора) в схеме на рис. 10.4 производится от вспомогательного контакта *Q3.2* выключателя *Q3* при его отключении. В цепи отключения предусмотрена накладка *SX1* для вывода цепи отключения из действия, что необходимо на случай питания обеих секций от трансформатора *T1* при замкнутом секционном выключателе. После отключения выключателя синхронного электродвигателя (компенсатора) его вспомогательным контактом *Q6.2* будет замкнута цепь на включение выключателя *Q5*.

Допускается вместо отключения выключателя синхронного электродвигателя (компенсатора) кратковременно отключать автомат гашения поля (АГП) и включать его вновь после включения секционного выключателя *Q5*. Толчок тока при таком способе будет меньше, чем при несинхронном включении, а после обратного включения АГП синхронный электродвигатель (компенсатор) втянется в синхронизм, т. е. произойдет его самосинхронизация. При наличии на подстанции нескольких синхронных электродвигателей контроль допустимости включения секционного выключателя от АВР обычно осуществляется с помощью реле минимального напряжения, т. е. АВР осуществляется с ожиданием снижения напряжения до 0,5–0,6 номинального.

Для быстрого отключения секционного выключателя в случае включения на неустранившееся КЗ на шинах подстанции, в схеме предусмотрено ускорение защиты секционного выключателя *Q5* после АВР. Ускорение осуществляется контактами *РПВ1.2* и *KQC3.2* реле *KQC1* и *KQC3,* которые подают плюс на мгновенный контакт реле времени защиты секционного выключателя. При работе с включенным секционным выключателем ускорение может быть выведено из действия накладкой *SX2*.

В отличие от схем АВР, рассмотренных выше, в схеме на рис. 10.4 отсутствует пусковой орган минимального напряжения, который в данном случае не нужен, так как оба источника питаются от общих шин высшего напряжения. При исчезновении напряжения на этих шинах действие АВР будет бесполезным. Таким образом, в случаях, когда рабочий и резервный источники питаются от общих шин, пусковой орган минимального напряжения устанавливать не требуется.

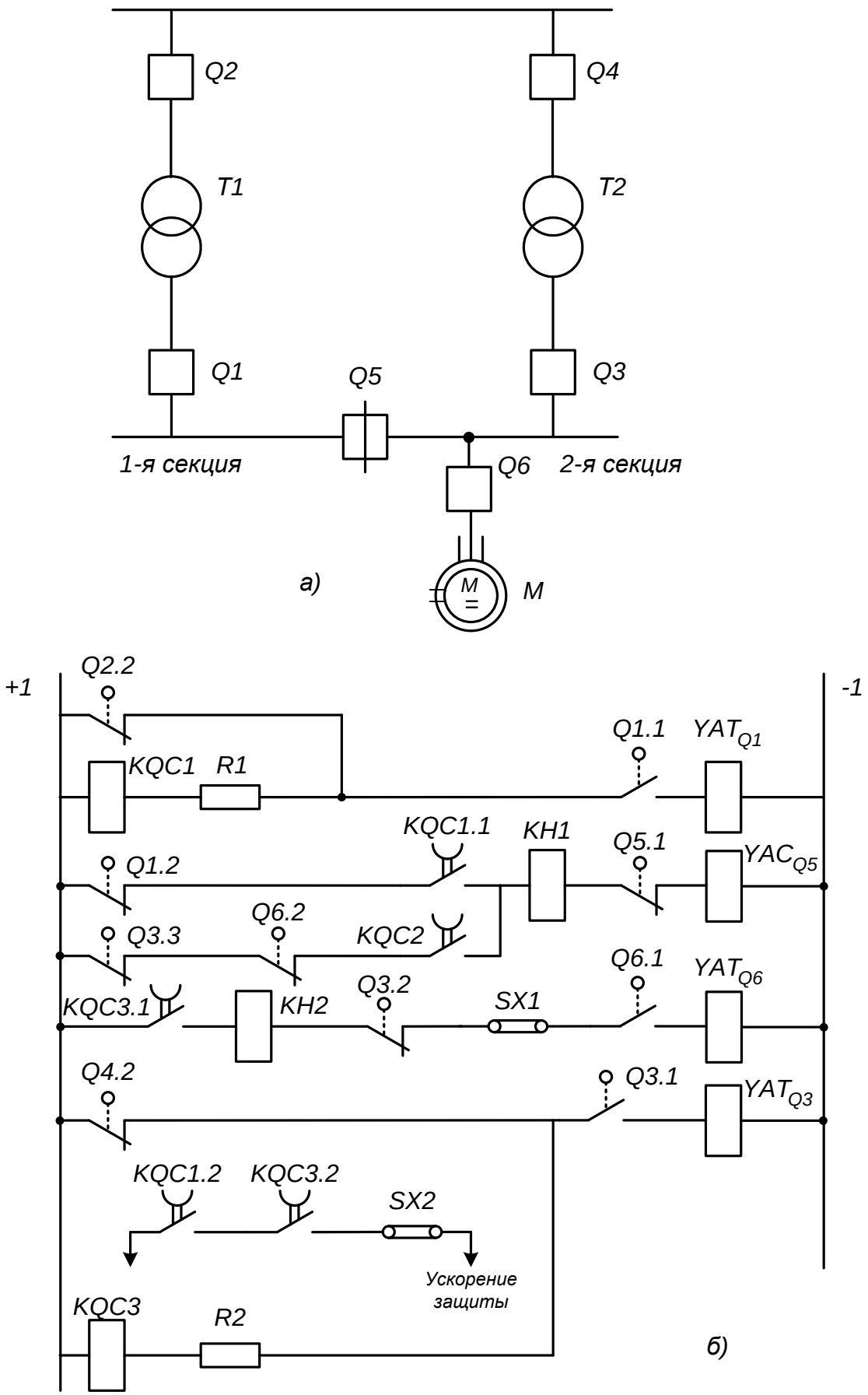


Рис. 10.4. АВР секционного выключателя для подстанции с синхронным электродвигателем
а – поясняющая схема; б – оперативные цепи

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ РЕЗЕРВНЫХ МЕХАНИЗМОВ

В установках собственных нужд тепловых электростанций наряду с рабочими предусматривается установка резервных механизмов, предназначенных для замены рабочего механизма при ремонте или неисправности. Кроме того, резервный механизм используется для участия в совместной работе с рабочим, когда последний один не может обеспечить нормального ведения технологического режима. Для выявления нарушения технологического режима используются специальные реле, реагирующие на неэлектрические величины. Так, например, реле давления, срабатывающие при понижении давления питательной воды в напорных линиях, могут быть использованы как датчики для пуска электродвигателя резервного питательного насоса. Для ускорения пуска резервного агрегата включение в работу его электродвигателя (АВР резервного агрегата) производится также от вспомогательного контакта выключателя электродвигателя рабочего агрегата при его отключении.

На рис. 10.5 приведена схема АВР двух электронасосов, каждый из которых может быть рабочим или резервным. Выбор рабочего электронасоса производится ключом *SA1*. На рис. 10.5б показаны общие цепи оперативного тока АВР. Цепи управления выключателей *Q1* и *Q2* выполняются по обычным схемам. Пусковым органом АВР является электроконтактный манометр *КМ,* контролирующий давление в магистрали за насосом после обратных клапанов. Положение ключа *SA1* в схеме на рис. 10.5б соответствует случаю, когда электронасос *НС2* находится в работе, а электронасос *НС1* в резерве. После пуска электронасоса *НС2* и появления нормального давления в магистрали контакт *КМ.1* замыкается, а *КМ.2* размыкается. При этом срабатывает промежуточное реле *KL1*, которое контактом *KL1.1* шунтирует контакт *КМ.1* для его разгрузки, а контактом *KL1.2* подготавливает цепь включения реле *KL2*. В таком положении АВР готов к действию. В случае отключений выключателя *Q2* замыкается его вспомогательный контакт и через еще замкнутый контакт реле однократности включения этого выключателя *KQC2* (реле положения «Включено») воздействует на *KL2,* включающее через контакт *KL2.2* выключатель *Q1*. Аналогично действует АВР, если в работе находился электронасос *НС1* и отключился выключатель *Q1*.

В случае снижения давления в магистрали контакт *КМ.1* размыкается, *КМ.2* замыкается и также воздействует на реле *KL2,* которое включает *Q1*. В обоих случаях реле *KL2,* сработав, размыкает контактом *KL2.1* цепь обмотки

реле *KL1*, чем разбирается схема АВР и обеспечивается однократность включения при действии АВР от контакта манометра.

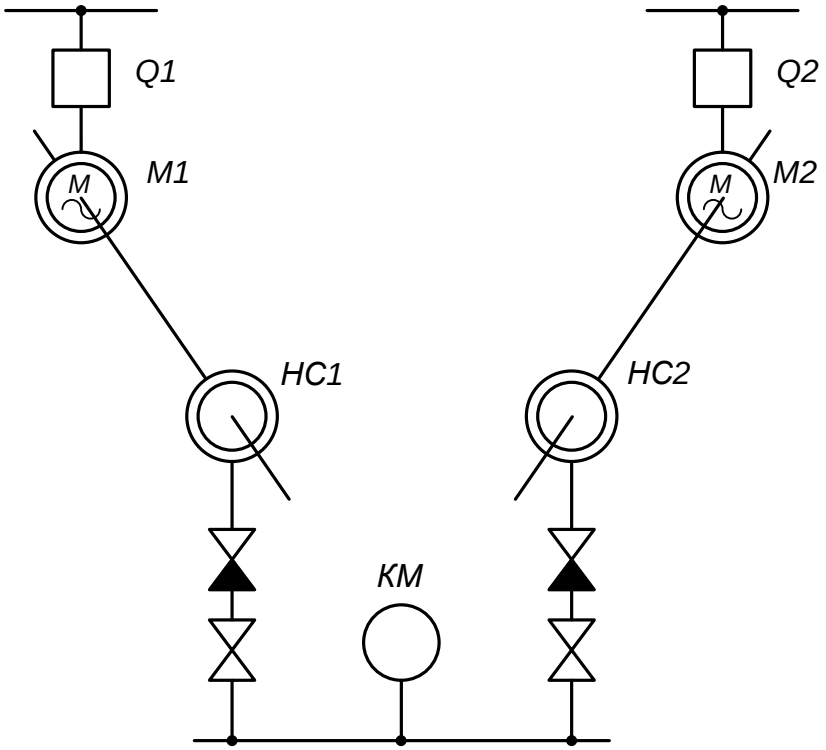


Рис. 10.5а. АВР электродвигателей насосов (поясняющая схема)

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕЕ МИКРОПРОЦЕССОРНОЕ УСТРОЙСТВО АВР (БАВР)

Пусковой орган БАВР (рис. 10.6б) значительно сложнее. Он состоит из двух различных комплектов измерительных реле *АК1* и *АК2*, действующих через логическую часть *ЛЧ* одновременно на включение резервного (секционного) *Q3* и отключение соответствующего рабочего *Q1* (или *Q2)* быстродействующих вакуумных выключателей двухтрансформаторной подстанции (рис. 10.6а), питающей синхронную нагрузку от двух разных взаиморезервирующих источников питания *ИП1, ИП2*.

Первый комплект *АК1*, предназначенный для действия при потере питания секции, в частности при трехфазном КЗ в цепях рабочего источника питания (например, *К1* на линии *W1),* содержит измерительные фильтр-реле напряжения *KVZ1* и направления активной мощности *KWZ1* прямой последовательности и угла *KΘZ1* сдвига фаз между напряжениями прямой последовательности на секциях шин ПС. В нормальном режиме напряжение

номинальное, сдвиг по фазе отсутствует, а мощность направлена от источника питания к нагрузке.

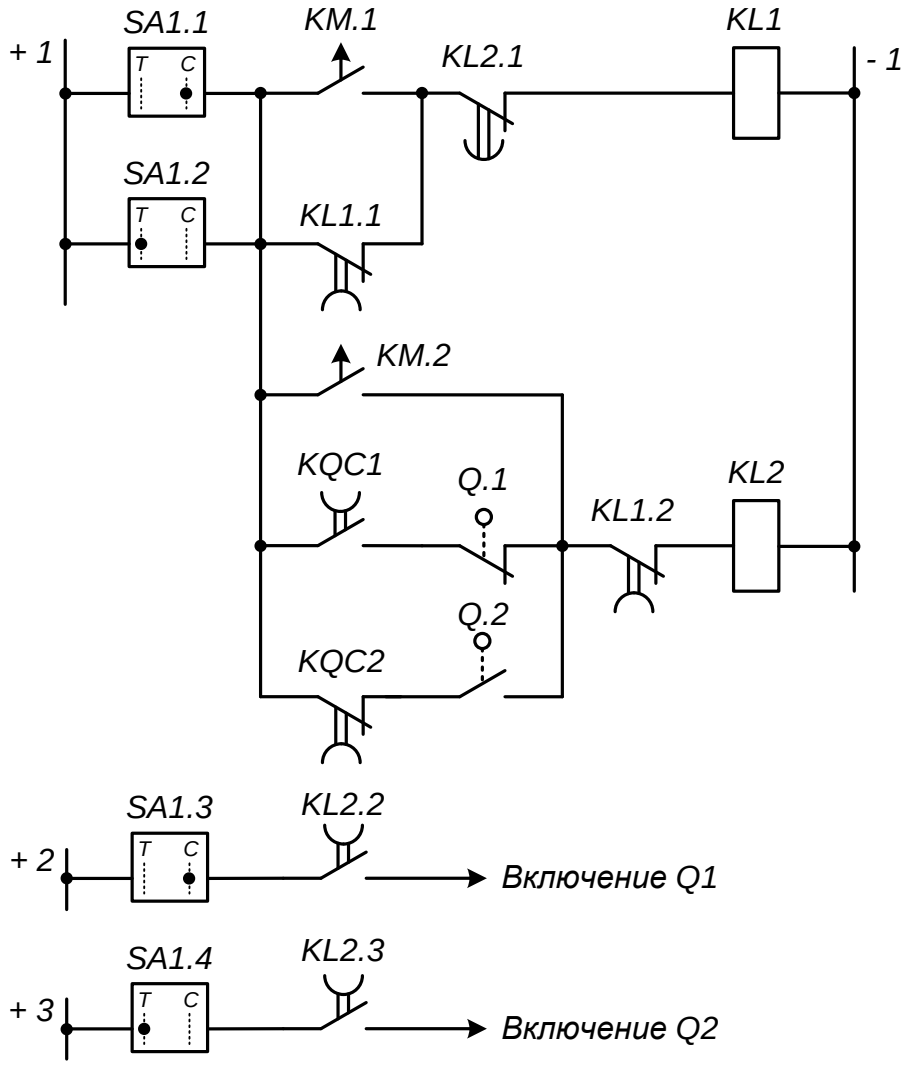


Рис. 10.5б. АВР электродвигателей насосов (цепи оперативного тока)

При указанном трехфазном КЗ или отключении выключателя на передающем конце линии напряжение снижается или исчезает, изменяется на противоположное направление активной мощности, выдаваемой синхронными электродвигателями (СД), появляется и увеличивается угол *Θ* сдвига фаз между напряжением на выводах уменьшающих частоту вращения *M1* (т.е. напряжением резервируемой секции) и напряжением резервирующей секций: фильтр-реле *KΘZ1* подключены к измерительным трансформаторам напряжения *TV1, TV2* разных секций. Срабатывают фильтр-реле *KVZ1* или *KΘZ1*, или оба (логический элемент *DW1)* и *KWZ1* (логический элемент *DX1*), и через логический элемент *DW2* формируется управляющее рабочим и резервным выключателями воздействие АВР.

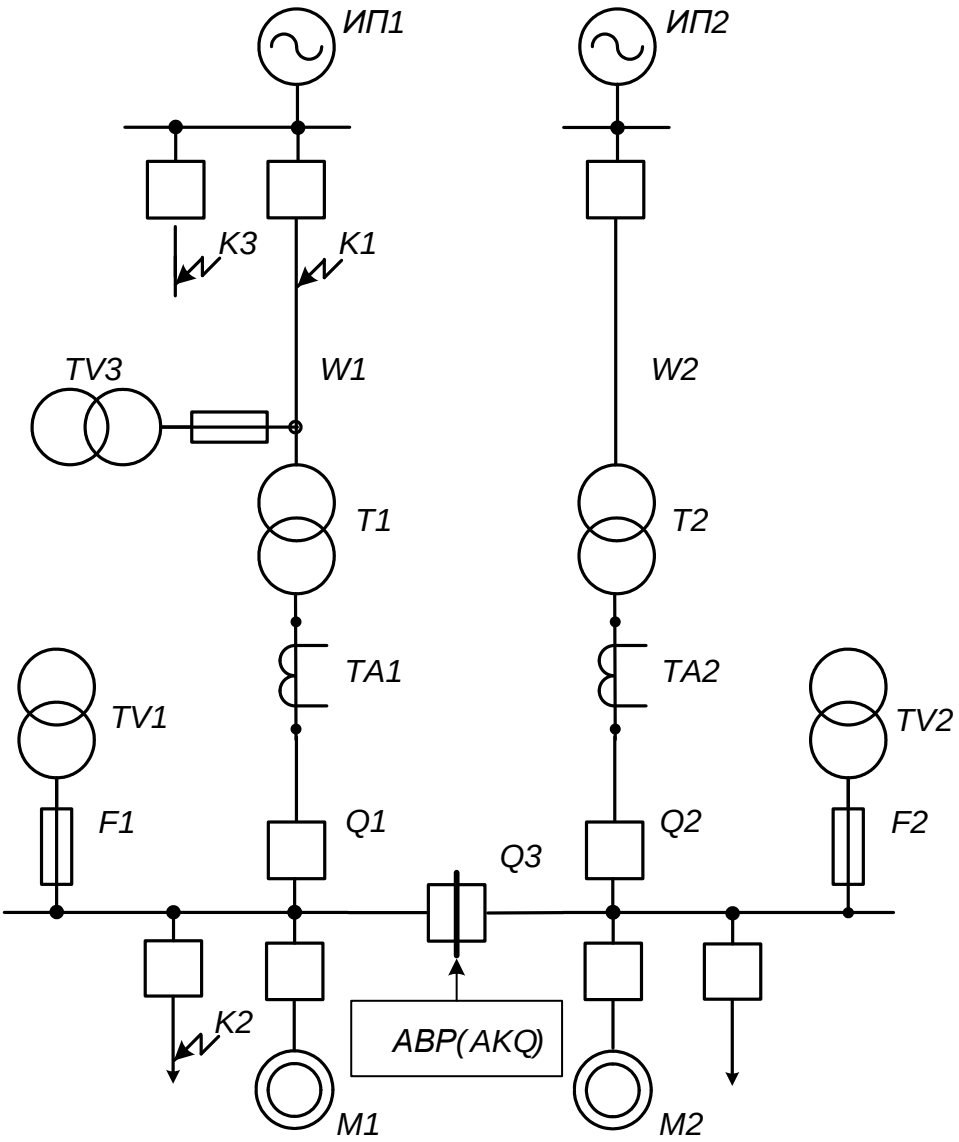


Рис. 10.6а. Схема подстанции для БАВР

При трехфазном или двухфазном КЗ на отходящей от секции шин линии (*К2*), при которых АВР не требуется, не срабатывает фильтр-реле *KWZ1*; СД потребляют активную мощность, и БАВР не действует.

Однако по указанной причине оно не запускается и при несимметричных КЗ в цепях источника питания (*К1*), при которых АВР необходимо. При этом вступает в действие второй комплект пусковых реле *АК2:* фильтр-реле *KVZ2* напряжения обратной последовательности и *KAZ1* реактивных мощности или тока прямой последовательности (логический элемент *DX2).* Действие *KVZ2* очевидно, а фильтр-реле *KAZ1* срабатывает вследствие возрастания в несколько раз генерируемого СД реактивного тока.

Рассмотренный пусковой орган излишне срабатывает при КЗ в электрической сети рабочего источника (например, *К3*), когда АВР не

требуется. Как указывалось, реле *KWZ1* отказывает при несимметричных КЗ, при которых АВР необходимо.

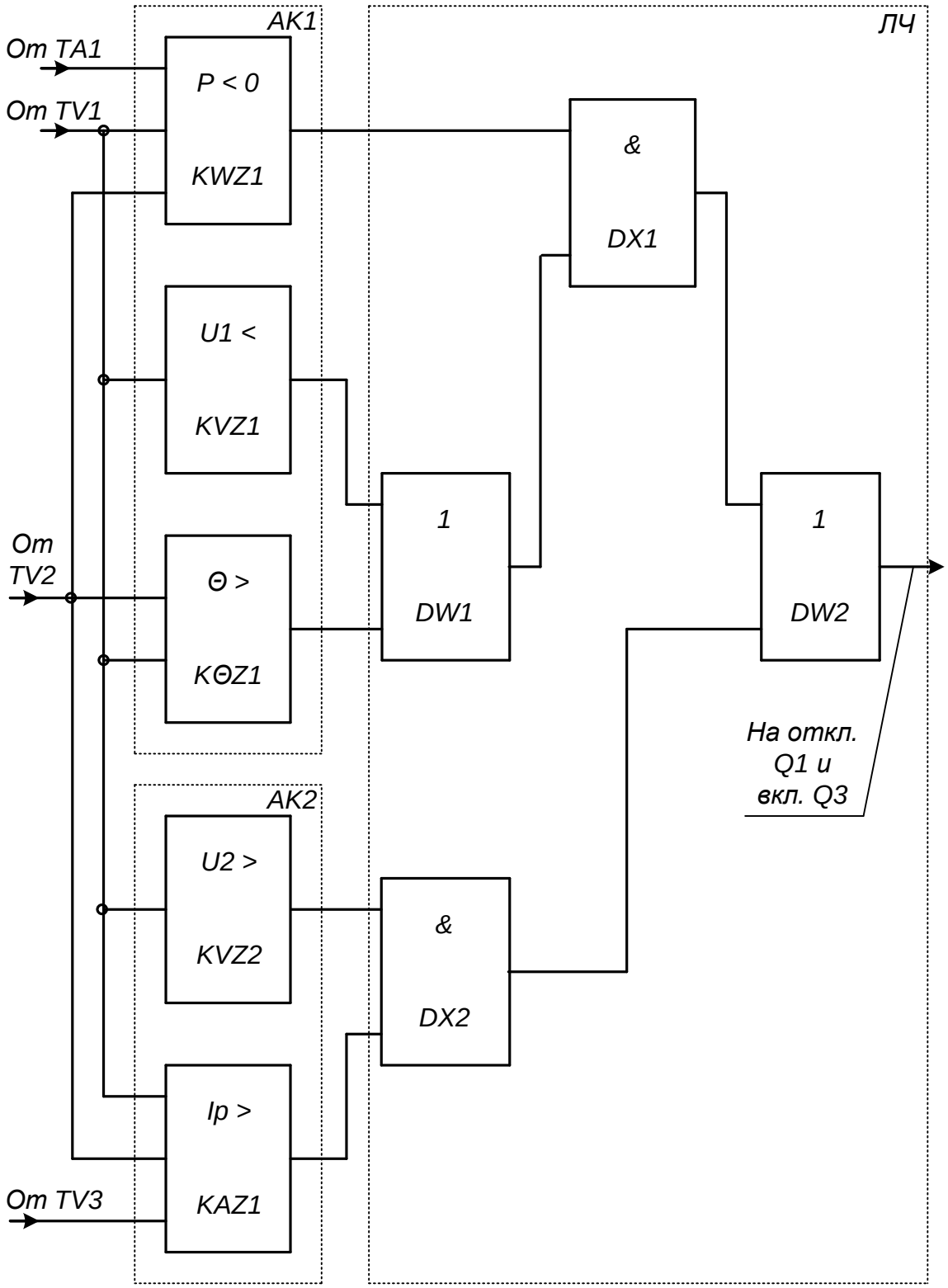


Рис. 10.6б. Функциональная схема БАВР

Поэтому в микропроцессорном БАВР пусковой измерительный орган состоит из направленного измерительного фильтр-реле сопротивления *KZZ1* и минимального фильтр-реле тока *KAZ1* прямой последовательности (рис. 10.7), подключенных к измерительным трансформаторам напряжения резервируемой секции, например *TV1,* и тока *TA1* (см. рис. 10.6,а). Фильтр-реле *KZZ1* четко срабатывает при любом КЗ в цепях источника питания *(К1)* и не срабатывает при КЗ на линиях, отходящих от резервируемой секции шин *(К2),* поскольку направление мощности прямой последовательности (реле направленное) сохраняется таким же, как и в нормальном режиме.

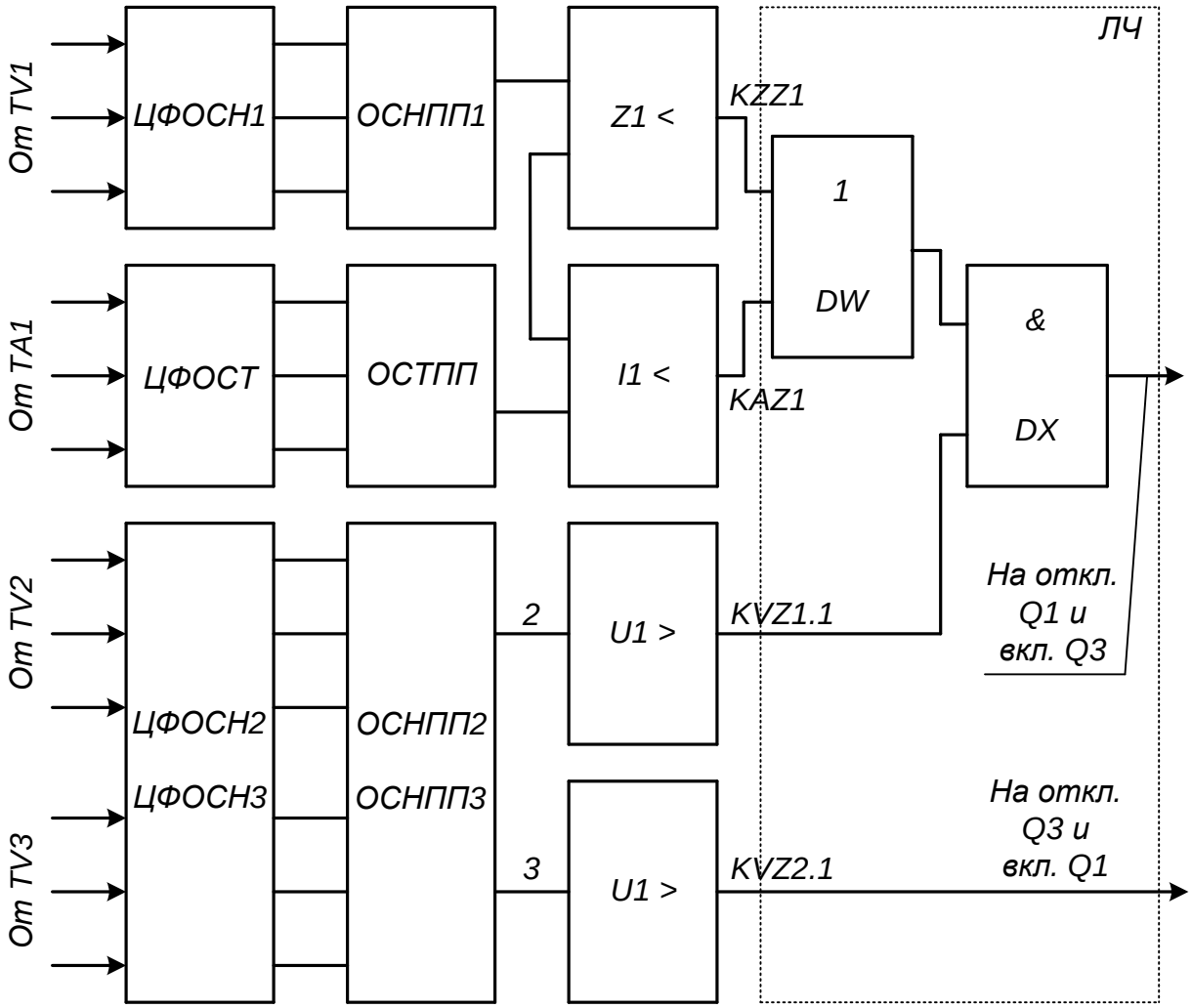


Рис. 10.7. Функциональная схема микропроцессорного устройства БАВР

Фильтр-реле *KAZ1* запускает БАВР (логический элемент *DW)* при потере питания, например вследствие отключения выключателя передающего конца рабочей линии *W1*. Однако фильтр-реле *KZZ1* не отличает КЗ в сети рабочего источника *(К1)* от КЗ на питающей линии *(К3)*: излишнее действие БАВР не устраняется. Поэтому предусматривается максимальное измерительное фильтр-

реле напряжения *KVZ2.1,* подключенное к трансформатору напряжения *TV3* рабочего трансформатора (см. рис. 10.6,а), которое после отключения КЗ в сети и восстановления напряжения рабочего источника ликвидирует излишнее действие БАВР, включая рабочий и отключая резервный выключатели.

На схеме (рис. 10.7) показано и максимальное фильтр-реле *KVZ1.1* напряжения прямой последовательности, подключенное к измерительному трансформатору напряжения *TV2* резервирующей секции (см. рис. 10.6,а), контролирующее наличие на ней напряжения и поэтому действующее с измерительным органом через элемент *DX* логической части *ЛЧ* автоматического устройства.

Микропроцессорный пусковой орган практически безынерционен: на формирование ортогональных составляющих междуфазных напряжений (цифровые формирователи – ЦФОСН) и разностей фазных токов (ЦФОСТ) затрачивается один-два интервала *T* их дискретизации аналого-цифровым преобразователем, а на формирование из них ортогональных составляющих напряжений (ОСНПП) и токов (ОСТПП) прямой последовательности и на действие измерительных реле – лишь вычислительное время микропроцессора, укладывающееся в один интервал дискретизации. При быстродействующих вакуумных выключателях микропроцессорные устройства БАВР значительно эффективнее его аналоговых прототипов.

Микропроцессорные устройства АВР входят в состав нескольких, разработанных в последнее время, многофункциональных интегрированных программных устройств противоаварийной автоматики.

Требования к отчету: В отчете по работе должна быть изображена с соблюдением требований ЕСКД схема АВР, заданная преподавателем для самостоятельного изучения. По усмотрению студента может быть приведен краткий конспект, в котором поясняется работа схема. При сдаче зачета необходимо уметь давать пояснения по существу выполненного задания, а также показать знание предмета в объеме программы.

Контрольные вопросы:

1. Почему включение резервного источника должно происходить только после отключения рабочего?

2. С какой целью применяются пусковые органы в устройствах АВР и в каких случаях не требуется их установка?

3. Сравните различные варианты выполнения пусковых органов.

4. В каких случаях осуществляется ускорение действия защиты после АВР и почему?

5. Чем обеспечивается однократность действия схемы АВР трансформатора?

6. По каким формулам выбираются уставки АВР?

7. Как работает схема АВР при различных видах повреждений и ненормальных режимах?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Меркурьев Г.В., Цирель Я.А. Расчеты режимов работы трансформаторов: учебное пособие. – С-Пб.: Изд-во Центра подготовки кадров энергетики. – 2004. – 38 с.

2. ГОСТ 14209-85. Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки.

3. СО 153-34.20.501-2003. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. [Электронный ресурс]. URL: http://snipov.net/c_4691_snip_105980.html (дата обращения 25.11.2013).

4. Киш Л. Нагрев и охлаждение трансформаторов / Пер. с венгерского. Под ред. Г.Е. Тарле. – М.: Энергия. – 1980. – 208 с.

5. Переходные процессы электрических систем в примерах и иллюстрациях: Учеб. пособие для вузов / В.В. Ежков, Н.И. Зеленохат, И.В. Литкенс и др. / Под ред. В.А. Строева. – М.: Знак, 1996. – 224 с.

6. Цирель Я.А., Поляков В.С. Эксплуатация силовых трансформаторов на электростанциях и в электросетях. – Л.: Энергоатомиздат, 1985.

7. Электромеханические переходные процессы в электрических системах. Учебно-методическое пособие к курсовому проектированию / А.Н. Козлов, В.А. Козлов, А.С. Степанов. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2013. – 112 с.

8. Грудинский П.Г., Мандрыкин С.А., Улицкий М.С. Техническая эксплуатация основного электротехнического оборудования станций и подстанций / под ред. П.И. Устинова. – М.: Энергия, 1974. – 570 с.

9. Гизила Е.П. Расчет устройств автоматики энергосистем. – Киев: Вища школа, 1974. – 344 с.

10. Авербух А.М. Релейная защита в задачах с решениями и примерами. – Л.: Энергия, 1975. – 416 с.

СОДЕРЖАНИЕ

	Предисловие	**3**
	Введение	**5**
	Перечень тем практических занятий	**6**
	Критерии достижения результатов обучения по блоку практических дисциплин	**7**
1	Определение допустимой величины и длительности систематической перегрузки трансформатора	**8**
2	Расчет токораспределения при параллельной работе трехобмоточных трансформаторов на двух обмотках при работе третьей обмотки на выделенную нагрузку	**17**
3	Нагрев силового трансформатора при нормальной работе	**24**
4	Нагрев силового трансформатора в режиме короткого замыкания	**38**
5	Расчет уравнительной мощности и загрузки при параллельной работе трансформаторов, отличающихся номинальными параметрами	**44**
6	Расчет потерь мощности и энергии в трехобмоточном трансформаторе	**51**
7	Оценка устойчивости узла нагрузки при потере связи с системой неограниченной мощности	**57**
8	Оценка возможности перерыва питания на шинах нагрузки по условиям самозапуска электродвигателя	**64**
9	Расчет самозапуска электродвигателя	**69**
10	Изучение схем устройств автоматики ввода резерва	**73**
	Библиографический список	**94**

Составитель:

Козлов Александр Николаевич,
доцент кафедры энергетики АмГУ, канд. техн. наук;

Основы эксплуатации электрооборудования:
*Методические указания к практическим занятиям***.**

Издательство АмГУ. Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 5,69.