

Министерство высшего и среднего
специального образования РСФСР

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

Инженер ПОПОВ Е. П.

ИССЛЕДОВАНИЕ СУШКИ
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ
ТРАНСФОРМАТОРОВ СЕЛЬСКИХ
ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК ПО СХЕМЕ ТОКА
НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

05.09.00

Научный руководитель
кандидат технических наук,
доцент ПЯСТОЛОВ А. А.

ЧЕЛЯБИНСК, 1966 г.

ЧПИ

Работа выполнена в Челябинском институте механизации и электрификации сельского хозяйства. Экспериментальная часть проведена в лабораторных условиях института и в промышленных условиях Курганского и Челябинского опытного электромеханических заводов и Минского электротехнического завода.

Диссертация изложена на 241 странице машинописного текста, включая два приложения, и иллюстрирована 70 рисунками.

Министерство высшего и среднего
специального образования РСФСР

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

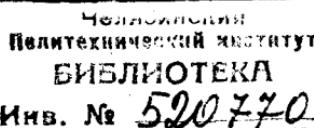
На правах рукописи

Инженер ПОПОВ Е. П.

ИССЛЕДОВАНИЕ СУШКИ
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ
ТРАНСФОРМАТОРОВ СЕЛЬСКИХ
ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК ПО СХЕМЕ ТОКА
НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук,
доцент ПЯСТОЛОВ А. А.



ЧЕЛЯБИНСК, 1966 г.

Уважаемый тов.

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся темой диссертации, принять участие в заседании Ученого Совета, посвященном защите, или прислать свои отзывы.

О дне и времени защиты за 10 дней будет опубликовано в газете «Челябинский рабочий».

Предварительно защита намечена на _____ 1966 г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Адрес института, г. Челябинск, проспект В. И. Ленина, 76.

Челябинский политехнический институт.

Дата отправки автореферата _____ 1966 г.

**Ученый секретарь доцент,
канд. техн. наук В. Н. Гончар**

Осуществление сплошной электрификации сельского хозяйства нашей страны связано с дополнительным введением в эксплуатацию громадного количества новых распределительных трансформаторов к большому числу существующих. Большое значение при сушке трансформаторной изоляции приобретают вопросы выбора наиболее рациональных способов нагрева и режимов сушки. Сушка трансформаторов требует больших затрат рабочего времени и электроэнергии. Для уменьшения их нужно использовать наиболее прогрессивные методы сушки. Сушка трансформаторов по схеме тока нулевой последовательности имеет ряд существенных преимуществ, однако еще мало исследована и недостаточно освещена в литературе, что мешает ее успешному внедрению в практику монтажа и ремонта. Не изучены вопросы определения и выбора оптимальных электрических параметров сушки трансформаторов новых серий, не исследованы режимы и технология. Следовательно, дальнейшее изучение и исследование вопросов, связанных с сушкой трансформаторов по схеме тока нулевой последовательности имеет определенное теоретическое и практическое значение. Необходимость в проведении научно-исследовательских работ и обобщении уже имеющихся исследований в области сушки трансформаторов этим методом стала особенно настоятельной в связи с переходом отечественной промышленности на выпуск трансформаторов новых серий и типажа с алюминиевыми обмотками и сердечниками из холоднокатанной стали и широким внедрением в эксплуатацию однофазных трансформаторов в смешанных трехфазно-однофазных сетях. Эти новые распределительные трансформаторы имеют конструктивные особенности, а оптимальные параметры сушки их до сих пор были неизвестны.

Задачей настоящей работы является определение оптимальных электрических и тепловых параметров и разработка наиболее рациональных режимов сушки всего комплекса распределительных сельскохозяйственных трансформаторов по схеме тока нулевой последовательности.

I. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ СУШКЕ ТРЕХФАЗНЫХ И ОДНОФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПО СХЕМЕ ТОКА НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

При сушке трансформаторов по схеме тока нулевой последовательности оптимальные значения напряжения U_0 , тока I_0 и мощности P_0 сушки определяются максимально-допустимой температурой нагрева изоляционных конструкций трансформатора при определенных величинах и соотношениях сопротивлений индуктивного X_0 , активного R_0 , полного Z_0 . Максимальная температура изоляции выемной части трансформатора при установившемся тепловом режиме должна поддерживаться на уровне 105—110°C (378—383°K).

Многочисленными экспериментами, проведенными на трансформаторах различных серий и мощности, установлено, что их сопротивления нулевой последовательности X_0 , R_0 и Z_0 являются сложной нелинейной функцией следующих переменных: 1) напряжения или тока нулевой последовательности (U_0 или I_0) и магнитной проницаемости стальных элементов трансформатора (μ), по которым замыкается поток нулевой последовательности (Φ_0), 2) температуры трансформатора (T), 3) геометрических размеров трансформатора, 4) существенное влияние на величины X_0 , R_0 и Z_0 оказывают естественные заводские и межзаводские отклонения в конструкции трансформаторов.

Закономерно, что в трансформаторах с алюминиевыми и медными обмотками, а также в однофазных трансформаторах, с увеличением приложенного напряжения U_0 сопротивление X_0 , а, следовательно, и Z_0 вначале несколько увеличиваются, затем в интервале напряжения $U_b = (0,07—0,1) U_{n\Phi}$ в трехфазных и $U_b = (0,1—0,13) U_{n\Phi}$ в однофазных трансформаторах достигают максимуму-

ма, после чего уменьшаются из-за влияния насыщения стенок бака и, начиная с определенной величины U_0 , стабилизируются. Зависимость $R_0 = F(U_0)$ проявляется значительно слабее. Общий диапазон изменения X_0 , R_0 , $Z_0 = F(U_0)$ по отношению к их значениям при оптимальных параметрах сушки в трансформаторах новых серий (ТМА, ТСМА, ТМ) достигает: $\Delta X_0 = 20-50\%$, $\Delta R_0 = -4-25\%$, $\Delta Z_0 = 20-46\%$.

Для трансформаторов вне бака диапазон отклонений сопротивлений X_0 , R_0 , Z_0 существенно меньше и составляет: $\Delta X_0 = 5-14\%$, $\Delta R_0 \approx 0\%$, $\Delta Z_0 = 1-10\%$. При оптимальных напряжениях сушки сопротивления в схеме тока нулевой последовательности соответствуют тем частям спадающих ветвей кривых X_0 , R_0 , $Z_0 = F(U_0)$, где эта зависимость проявляется значительно слабей и близка к прямой, параллельной оси абсцисс. В этих условиях диапазон отклонений в величинах рассматриваемых сопротивлений не превышает 7-8%, а во многих случаях он меньше.

Анализ приведенных в работе данных показывает, что сопротивления X_0 , R_0 и Z_0 в трансформаторах с алюминиевыми обмотками больше, чем в трансформаторах медной серии. При этом в конструктивно-подобных трансформаторах отношение Z_0/Z_k в серии ТМА (с сердечниками из горячекатанной стали) выше на 20-40%, чем в серии ТСМА (с сердечниками из холоднокатанной стали).

Исследованиями установлено, что при нагревании трансформаторов от 15-18 до 105-110°C (от 288-291 до 378-383 K) при сушке их по схеме тока нулевой последовательности сопротивления X_0 , R_0 и Z_0 увеличиваются, а ток сушки уменьшается на 7-12%. Рост сопротивлений происходит в первые 3-4 часа нагрева, после чего они стабилизируются. Установлено, что на температурные характеристики X_0 , R_0 и $Z_0 = F(T)$ наиболее существенное влияние оказывает нагрев бака и деталей крепежа выемной части трансформатора, которые успевают нагреться до установившейся температуры практически через 2-4 часа после приложения напряжения сушки U_0 . Мощность сушки P_0 в процессе нагрева также уменьшается вследствие квадратичной зависимости потерь от тока I_0 .

Эксперименты показывают, что при одном и том же

подведенном напряжении U_0 наблюдается определенный разброс в значениях X_0 , R_0 и Z_0 от средних в трансформаторах одной и той же серии и мощности, вызванный естественными заводскими отклонениями в их конструкции. Наибольший разброс, достигающий 13—14%, наблюдается в значениях сопротивлений R_0 , что можно объяснить неодинаковостью в конструкции баков трансформаторов. Разбросы в значениях X_0 и Z_0 примерно в 1,5 раза меньше. Установлено, что естественные меж заводские отклонения в конструкции трансформаторов увеличивают разброс в значениях X_0 , R_0 и Z_0 в 1,4—1,5 раза по отношению к разбросу, вызванному только внутри заводскими конструктивными отклонениями. При оптимальных напряжениях сушки заводские и меж заводские отклонения в значениях сопротивлений X_0 , R_0 , Z_0 от их средних, как показали многочисленные измерения, не превосходят $\pm(2—3)\%$.

В работе доказано, что при определении сопротивлений трансформаторов при сушке по схеме тока нулевой последовательности возможен неучет первой и второй зависимостей, так как допустимо считать, что в диапазоне оптимальных напряжений сушки зависимость R_0 , X_0 , $Z_0 = F(U_0)$ близка к прямой, параллельной оси абсцисс (ось « U_0 »), а сушка изоляции происходит при постоянной установленной температуре, равной максимально допустимой. В этих условиях отклонения электрических параметров нулевой последовательности определяются только заводскими и меж заводскими отклонениями в конструкции трансформаторов. В работе показано, что внутри- и меж заводские отклонения в конструкции трансформаторов даже при самом неблагоприятном сочетании условий, не вызывают опасного повышения мощности сушки. Колебания в значениях оптимальных напряжений сушки, вызванные естественными внутри- и меж заводскими отклонениями в конструкции трансформаторов составляют $\pm 3,5—4\%$, что соответствует изменению оптимальной мощности в диапазоне $\pm 12\%$. При этом во всех случаях перегрева изоляции трансформаторов не наблюдалось.

С увеличением U_0 коэффициент мощности $\cos \phi_0$ вначале возрастает на 10—12%, а начиная с $U_0 = (0,15—0,18) U_{\text{нф}}$ остается постоянным. Отклонения значений $\cos \phi_0$ трансформаторов различных серий и мощности,

вызванные внутри- и меж заводскими отклонениями в их конструкциях не превосходят $\pm 10\%$, а во многих случаях они равны $\pm 5-6\%$. В трансформаторах алюминиевых серий ТМА, ТСМА и ТМ (по новому типажу) при сушке по схеме тока нулевой последовательности коэффициент мощности $\cos \phi_0$ довольно стабилен и составляет 0,52, для трансформаторов с медными обмотками — в среднем $\cos \phi_0 = 0,50$.

Следует отметить, что конструкция маслоохладительных устройств не оказывает заметного влияния на распределение потока Φ_0 , а, следовательно, и на $\cos \phi_0$ и на X_0, R_0, Z_0 .

При сушке трансформаторов по схеме тока нулевой последовательности важно знать мощность и местонахождение основных источников тепла.

Исследования показали, что в распределительных трансформаторах серий ТМА, ТСМА и ТМ (по новому типажу) основными источниками тепла при сушке являются стенки бака и сердечник с его крепежными деталями. При этом относительно большая величина потерь приходится на бак (в трехфазных трансформаторах — до 60—75%). При сушке однофазных трансформаторов серии ОМС потери в баке и сердечнике распределяются примерно поровну. Относительные потери в баке возрастают с уменьшением зазора между магнитопроводом и стенками бака. По сравнению с трехфазными, в однофазных трансформаторах серии ОМС этот зазор относительно больше, поэтому потери в баке относительно меньше. Вследствие той же зависимости в трансформаторах алюминиевой серии потери в стенах бака относительно больше по сравнению с трансформаторами медной серии ТМ (устаревший типаж). Потери в проводниках намагничивающей обмотки невелики и уменьшаются с ростом номинальной мощности трансформатора. Наличие внутренних (сердечник, намагничивающая обмотка НН) и внешних (бак) источников тепла создает благоприятные условия при сушке как трехфазных, так и однофазных трансформаторов.

С увеличением номинальной мощности трансформаторов оптимальные значения тока и мощности сушки возрастают по абсолютной величине. При этом требуемое напряжение сушки уменьшается. В трансформаторах исследуемых серий зависимости тока и мощности сушки

от номинальной мощности трансформаторов близки к уравнению прямой.

В трансформаторах новых серий ТМА, ТСМА, ТМ оптимальные мощность и ток сушки постоянны для трансформаторов различной серии, но одной и той же мощности, что объясняется их конструктивным подобием. При этом значения оптимального напряжения сушки различны. Напряжение U_0 в трансформаторах ТМА больше по величине, чем в трансформаторах ТСМА. При этом оптимальные напряжения сушки трансформаторов новейшей алюминиевой серии ТМ и устаревшей медной серии ТМ близки по своей величине, но несколько меньше, чем в серии ТСМА, что объясняется определенными соотношениями в сопротивлениях нулевой последовательности.

II. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СУШКИ ТРАНСФОРМАТОРОВ

При расчетах, связанных с сушкой трехфазных и однофазных распределительных трансформаторов по схеме тока нулевой последовательности, оптимальные электрические параметры сушки можно с достаточной степенью точности определить по следующим простым формулам.

а) Полное сопротивление сушки

Полное сопротивление трансформатора при сушке по схеме тока нулевой последовательности можно определить следующим образом.

1. По сопротивлению короткого замыкания трансформатора Z_k и отношению высоты обмотки l_s к расстоянию между магнитопроводом и стенками бака b .

$$Z_0 = k Z_k \frac{l_s}{b}. \quad (1)$$

Установлено, что выражение (1) справедливо для распределительных трансформаторов всех серий и мощностей. Исследования показывают, что в отличие от трансформаторов с медными обмотками, для которых коэффициент пропорциональности $k = 4—5$, в трансформаторах алюминиевой серии $k = 3$ — для ТСМА и ТМ (по новому типажу) с магнитопроводом из холоднокатанной стали и

$k = 4$ для ТМА с магнитопроводом из горячекатанной стали.

Для однофазных трансформаторов серии ОМС с круглыми баками выражение (1) также справедливо. При этом при расчетах следует считать, что Z_0 и Z_k соответственно полное сопротивление и сопротивление короткого замыкания трансформатора, отнесенные к одной катушке намагничивающей обмотки низшего напряжения, $k = 4$, а $b = b_s$.

$$b_s = 0,36b_1 + 0,64b_2, \quad (2)$$

где b_s , b_1 , b_2 — соответственно эквивалентное, наибольшее и наименьшее расстояние от магнитопровода до стенок бака.

2. По относительному значению Z_0 .

$$Z_0 = \frac{Z_0 \% \cdot U_n^2}{100 \cdot S_n} \quad (3)$$

где S_n — номинальная мощность трансформатора.

U_n — номинальное линейное напряжение намагничивающей обмотки трансформатора.

Установлено, что при оптимальном режиме сушки значения $Z_0 \%$, отнесенные к номинальным параметрам трансформатора, носят довольно стабильный характер. С достаточной степенью точности можно принять, что $Z_{0cp} = 55\text{--}56\%$ для трансформаторов серий ТСМА и ТМ — с алюминиевыми обмотками по новому типажу, а также для ТМ — с медными обмотками по устаревшему типажу; $Z_{0cp} = 65\%$ — для ТМА. В однофазных трансформаторах серии ОМС $Z_{0cp} = 25\%$ (на одну катушку) и $Z_{0cp} = 50\%$ (на две последовательные катушки).

б) Мощность сушки

Мощность сушки распределительных трансформаторов новых и устаревших серий с достаточной точностью можно определить двумя способами.

1. По удельным потерям, приходящимся на единицу поверхности бака.

$$P_0 = \rho_0 \cdot F_6, \text{ квт}, \quad (4)$$

где F_6 — полная поверхность бака, m^2 .

ρ_0 — удельная мощность, приходящаяся на единицу поверхности бака, $\frac{\text{квт}}{m^2}$.

Найдено, что удельная мощность сушки для трехфазных трансформаторов алюминиевых серий ТМА, ТСМА, ТМ составляет в среднем $1 \frac{\text{квт}}{\text{м}^2}$, для однофазных трансформаторов серии ОМС — $0,5 \frac{\text{квт}}{\text{м}^2}$. Для трансформаторов устаревшей серии с медными обмотками эта мощность составляет $(0,65—0,9) \frac{\text{квт}}{\text{м}^2}$

2. По номинальной мощности трансформатора.

На основании опытных данных для трёхфазных трансформаторов новых и устаревших серий получено выражение

$$P_0 = 0,8 + 0,016 S_n, \text{ квт}, \quad (5)$$

где S_n — номинальная мощность трансформатора, ква.

Исследования, проделанные в настоящей работе, показали, что удельная мощность при сушке трансформаторов по схеме тока нулевой последовательности на 20—40% меньше удельной мощности при сушке трансформаторов индукционными потерями в баке.

в) Ток сушки

Для трансформаторов новых серий (ТМА, ТСМА, ТМ) ток сушки при соединении намагничивающей обмотки низшего напряжения как в звезду, так и в треугольник может быть найден по следующей формуле

$$I_0 = 10 + 0,3 S_n, \text{ а.} \quad (6)$$

Формула (6) пригодна как для новых, так и устаревших серий трансформаторов.

Опытные данные показывают, что при определении Z_0 , I_0 , P_0 погрешность приведенных уравнений не превышает $\pm 10\%$, а во многих случаях она меньше.

г) Напряжение сушки

Напряжение сушки может быть определено:

1. При параллельном соединении намагничивающей обмотки

$$U_0 = \sqrt{\frac{P_0 \cdot Z_0}{m \cdot \cos \varphi_0}} \quad \text{и} \quad U_0 = I_0 \cdot Z_0. \quad (7)$$

Таблица 1

Мощность сушки трансформаторов различных серий

Серия трансформатора	Мощность сушки в квт при номинальной мощности трансформатора в ква												
	20	25	30	40	50	60	63	100	160	180	250	320	400
TMA	1,0	—	1,3	1,48	—	1,9	—	2,5	3,4	3,7	—	5,8	—
TCMA	1,0	—	1,28	1,44	—	1,75	1,8	2,4	—	3,6	4,8	5,8	7,2
TM (по новому типажу)	—	1,1	1,28	1,44	—	1,75	1,8	2,4	3,4	—	4,8	—	7,2
TM (по устаревшему типажу)	1,0	—	1,26	—	1,5	—	—	2,4	—	2,6	—	3,5	—

Таблица 2

Ток сушки волях от номинального I_0/I_n трансформаторов различных серий

Серия трансформатора	Ток сушки волях от номинального I_0/I_n при номинальной мощности трансформатора в ква											
	30	40	50	60	63	100	160	180	250	320	400	
TMA, TCMIA, TM	—	0,35	—	0,27	0,27	0,26	0,26	0,25	0,25	0,26	0,26	0,25
TM (по устаревшему типажу)	0,5	—	0,44	—	—	0,3	—	0,22	—	0,21	—	—

Таблица 3

Оптимальные напряжения сушки трехфазных трансформаторов различной мощности и серии при параллельном соединении фаз намагничивающей обмотки

Серия трансформатора	Номинальное напряжение на намагничивающей обмотке НН, в	Напряжение сушки в вольтах при номинальной мощности трансформатора в ква												
		20	25	30	40	50	60	63	100	160	180	250	320	400
TCMA	400	—	—	50	43	—	41	41	37	34	39	31	29	26
	230	—	—	29	25	—	24	24	21	20	19	18	17	15
TMA	400	—	—	61	—	—	50	—	42	—	36	—	31	—
	230	—	—	35	—	—	29	—	24	—	21	—	18	—
TM (по новому типажу)	400	—	—	56	—	46	—	—	38	35	31	—	28	24
	230	—	—	32	—	27	—	—	22	20	18	—	16	14
TM (по старому типажу)	400	—	—	52	—	41	—	—	35	—	31	—	25	—
	230	69	40	—	30	—	25	—	—	20	—	18	—	15

2. При последовательном соединении намагничивающей обмотки

$$U_o = \sqrt{\frac{m \cdot P_o \cdot Z_o}{\cos \varphi_o}} \quad \text{и} \quad U_o = mI_o \cdot Z_o, \quad (8)$$

где m — число фаз или катушек трансформатора.

Средние значения оптимальных электрических параметров сушки исследуемых трансформаторов — трехфазных мощностью 20—400 ква и однофазных мощностью 5 и 10 ква, — найденные экспериментальным путем, приведены в таблицах 1, 2, 3 и 4. При установлении этих па-

Таблица 4

**Оптимальные электрические параметры
сушки однофазных трансформаторов**

Марка трансформатора	Номинальное напряжение намагничивающей обмотки, в	Способ соединения намагничивающей обмотки	U_o , в	I_o , а	P_o , вт
ОМС-5/6-10	2×230	параллельное последовательное	80 160	7,5 7,5	515 515
ОМС-10/6-10	2×230	параллельное последовательное	70 140	13 13	800 800

Примечание: U_o — напряжение сушки.

I_o — ток сушки на одну катушку намагничивающей обмотки.

P_o — суммарная мощность сушки.

метров контроль за напряжением, током и мощностью сушки осуществлялся соответствующими приборами класса точности 0,2—0,5, входящими в комплекты К-50 или КИП. Измерение температуры в различных точках трансформаторов производилось с помощью многочисленных (до 60—70 шт. в одном трансформаторе) термопар медь — константан.

**III. ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ
ПРИ СУШКЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПО СХЕМЕ ТОКА
НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ**

Успешное проведение быстрой и качественной сушки трансформаторов при естественной вентиляции бака и

нормальном барометрическом давлении определяется величиной температуры и характером ее распределения в различных элементах трансформатора и в первую очередь в изоляционных конструкциях, подлежащих сушке. Исследования тепловых режимов проводились при напряжении, токе и мощности сушки, соответствующих оптимальному распределению температуры по элементам трансформатора. Максимальная температура в изоляционных конструкциях исследуемых трансформаторов не превосходила наибольшую допустимую величину 105—110° С (378—383° К).

Установлено, что при безвакуумной сушке трансформаторов достигается вполне достаточная степень высыпивания материала; нужный объем воздуха обеспечивается естественной вентиляцией бака. При сушке трансформаторов новых серий с алюминиевыми обмотками, как и трансформаторов с медными обмотками, распределение температуры по изоляционным элементам трансформаторов в оптимальных режимах является благоприятным. Градиенты влажности и температуры совпадают по направлению, ускоряя выход влаги из изоляции. Особое внимание уделено исследованию распределения температуры во внутренних областях обмоток. Исследования показывают, что в трехфазных трансформаторах новых серий радиальный перепад температуры в уставившемся тепловом режиме от сердечника к поверхности обмотки ВН составляет 3—7° в средней и 7—15° в верхней и нижней частях трансформатора, имея по всей высоте выемной части одно и то же положительное направление. Поток тепла от внутренних источников — сердечника и обмотки НН — имеет то же самое направление. При этом осевая неравномерность нагрева изоляционных конструкций выемной части трансформаторов серии ТСМА составляет: для магнитопровода — 0,88—0,76; для обмотки НН — 0,83—0,74; для обмотки ВН — 0,82—0,71. Меньшие значения характеризуют трансформаторы большей мощности.

При оптимальных параметрах сушки температура бака на уровне середины обмоток в трансформаторах алюминиевой серии мощностью 20—400 ква колеблется в небольших пределах и составляет 115—125° С (388—398° К) в отличие от трансформаторов медной серии, где нагрев бака не превышает 55—85° С (328—358° К).

Вследствие более высокой температуры нагрева баков сушки трансформаторов алюминиевой серии проходит при более высокой температуре обмоток ВН. Элементы выемной части трансформатора, относящиеся к среднему стержню, вследствие неравномерности магнитной индукции и различных условий охлаждения имеют температуру нагрева на 4—9° выше элементов крайних стержней.

Установлено, что общее время нагрева трансформаторов алюминиевой серии мощностью 20—400 ква при оптимальных электрических параметрах сушки составляет 10—18 часов. При этом время нагрева наиболее массивного осушаемого элемента — обмотки ВН почти не зависит от номинальной мощности трансформатора и составляет 10—12 часов. Внутренние слои обмотки ВН, примыкающие к бумажно-бакелитовому цилиндру, нагреваются до установившейся температуры несколько позже — через 14—15 часов. Время нагрева магнитопровода — 13—18 часов, обмотки НН — 13—16 часов (для трансформаторов большей мощности требуется большее время нагрева). Наиболее быстро, за 0,5—1,5 часа, нагреваются вертикальные шпильки и бак трансформатора. Быстростабилизирующаяся температура нагрева бака убыстряет нагрев всей выемной части.

Впервые проведенное исследование сушки однофазных трансформаторов показало, что она протекает при вполне благоприятных температурных режимах. Вследствие относительно больших расстояний между магнитопроводом и стенками бака в однофазных трансформаторах радиальный положительный перепад температуры от магнитопровода до поверхности обмотки ВН больше, чем в трехфазных, и достигает 25—29°, что ускоряет выход влаги из изоляции в окружающую среду. Максимальная температура нагрева бака в однофазных трансформаторах при максимально-допустимой температуре изоляционных конструкций не превышает 85—90° С (358—363° К).

Из элементов трансформатора, содержащих изоляцию, наиболее нагретыми в ходе сушки являются стержни магнитопровода в их верхней части и верхние консоли. Из элементов крепежа максимальный нагрев имеют вертикальные шпильки консолей, температура которых может доходить до 170—190° С (343—363° К). Однако,

сравнительно высокая температура нагрева этих шпилек не опасна для изоляции, так как они значительно удалены от нее и являются маломощными источниками тепла.

IV. ФОРСИРОВАНИЕ НАГРЕВА ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРИ СУШКЕ

Продолжительность нагрева трансформаторов составляет 30—50% от общего времени сушки. Для экономии времени нагрева, а, следовательно, и времени сушки целесообразно производить ускоренный нагрев трансформаторов путем подведения к зажимам намагничивающей обмотки повышенного напряжения в процессе нагрева с последующим переключением в ходе сушки на оптимальное значение. Оптимальные параметры форсированного нагрева определяются следующими факторами: 1) максимально-допустимой температурой нагрева изоляции, 2) величиной и временем приложения повышенного напряжения, 3) наибольшей экономией времени нагрева. Исследованиями установлено, что этим требованиям удовлетворяет режим форсированного нагрева продолжительностью 2—2,5 час. Величина оптимального напряжения форсированного нагрева трансформатора может быть определена по формуле

$$U_{0 \text{ пов}} = 1,3 U_0, \quad (9)$$

Экономия времени нагрева и полного времени сушки при этом соответственно составляет:

в однофазных трансформаторах 50—55% и 25—30%.

в трехфазных трансформаторах 34—40% и 15—20%.

При этом за счет лучшего использования тепла при форсированном нагреве наблюдается некоторая экономия электроэнергии, равная 6—10%.

Подробно исследована динамика нагрева отдельных элементов трансформатора, включая внутренние слои обмоток ВН и НН.

V. СУШКА ТРАНСФОРМАТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕРМОДИФФУЗИИ

Увеличение положительного температурного градиента во внутренних областях обмоточной изоляции уско-

ряет выход влаги к поверхности осушаемой изоляции. Охлаждение поверхностных слоев изоляции достигалось периодическим отключением питания намагничивающей обмотки. При сушке исследуемых трансформаторов с использованием термодиффузии особое внимание уделялось выбору и обоснованию оптимального режима прерывистой сушки. Исследованиями установлено, что в циклах охлаждения наиболее быстро остывают стенки бака трансформатора, температура которых через 20–30 мин. после отключения намагничивающей обмотки снижается со 115–125 до 45–50° С (с 388–398 до 318–323° К), а через 1,5–2 часа практически почти не отличается от температуры окружающего воздуха, чем обеспечивается при естественной вентиляции воздуха в баке достаточно высокая скорость уменьшения температуры поверхностных слоев наиболее трудно осушаемого элемента — обмотки ВН. При этом температура магнитопровода и внутренних областей обмоток остается достаточно высокой.

Установлено, что в цикле термодиффузии в обмотке ВН по всей ее высоте температурный перепад между внутренними и внешними слоями увеличивается с 4–9° до 16–26° через 30–60 минут после отключения источника питания и поддерживается 5–6 часов. Средний температурный градиент между слоями обмотки ВН в этот отрезок времени в 4–6 раз больше, чем при нормальном режиме сушки. Следовательно, в обмотке ВН наибольшая скорость перемещения влаги от внутренних слоев изоляции к поверхности будет иметь место в первые 5–6 часов охлаждения. Положительный термоградиент между внутренними и внешними слоями обмотки НН также высок. При температуре окружающего воздуха 15–21° С (288–294° К) температура поверхности обмотки ВН после остывания в течение 6 и 8 час. сохраняется на уровне соответственно 36–40° (309–313° К) и 30–35° С (303–308° К). Понижать температуру поверхностных слоев обмотки ВН ниже 30–35° С (303–308° К) не рекомендуется, так как это затягивает процесс сушки.

В работе подробно исследованы три наиболее возможные в производственных условиях технологические схемы сушки трансформаторов с использованием термодиффузии, которые проверены на опытных сушках ряда трансформаторов и дали положительные результаты.

Однако, с точки зрения положительного распределения температуры, сокращения времени и улучшения качества сушки наиболее эффективна следующая схема:

- а) первоначальный форсированный нагрев 8—10 час.
- б) последующие циклы охлаждения 6—8 час.
- в) последующие циклы форсированного нагрева 8 час.

При использовании этой схемы общее время сушки распределительных трансформаторов с применением термодиффузии в среднем равно времени сушки при постоянно включенном трансформаторе или несколько меньше. Однако при этом достигается существенная экономия расхода электроэнергии, составляющая 20—40 %.

Применение прерывистого нагрева при сушке однофазных трансформаторов малоэффективно, так как в них в процессе сушки нормально существуют значительные по величине положительные термоградиенты.

VI. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОРОТКОЗАМКНУТЫХ КОНТУРОВ ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ СУШКЕ

Конструкции исследуемых трансформаторов характеризуются наличием короткозамкнутых контуров для потоков нулевой последовательности, образованных металлическими деталями крепежа выемной части. Установлено, что причиной нагрева элементов короткозамкнутых контуров являются, в основном, тепловые потери в них на перемагничивание и вихревые токи. Потери от сквозных токов ничтожно малы. При этом нагревание консолей в определенной мере способствует нагреву стержней и ярма магнитопровода.

Для уменьшения нагрева шпилек и консолей наиболее эффективным мероприятием является искусственная изоляция шпилек от консолей (например, прокладками из электрокартона в местах контактных соединений).

В работе, кроме того, рассмотрены энергетические вопросы сушки трансформаторов по схеме тока нулевой последовательности и даны в качестве приложений результаты опытных сушек трансформаторов и технологические карты сушки.

Общие выводы

1. Безвакуумная сушка трансформаторов в собственных баках при естественной вентиляции воздуха в баке и температуре сушки 100—110°С (373—383°К) обеспечивает вполне достаточную степень высыпивания изоляции.

2. Установлено, что при сушке распределительных трансформаторов всех серий по схеме тока нулевой последовательности наблюдается благоприятное распределение температуры по элементам выемной части трансформатора. Градиенты температуры и влажности совпадают по направлению, ускоряя выход влаги из изоляции.

3. Сушка выемной части трансформаторов алюминиевых серий проходит при более высокой температуре нагрева обмотки ВН по сравнению с трансформаторами медных серий.

4. В работе доказано, что токовая сушка однофазных распределительных трансформаторов серии ОМС вполне возможна и протекает в благоприятных условиях, обеспечивающих достаточную скорость и качество сушки.

5. Из элементов трансформатора, содержащих изоляцию, наиболее нагретыми при сушке являются стержни магнитопровода в их верхней части и верхние консоли. Контроль за тепловым режимом при сушке рекомендуется вести по температуре нагрева стержней магнитопровода.

6. При оптимальных параметрах сушки появление в изоляции трансформаторов местных перегревов исключается.

7. Оптимальные электрические величины, характеризующие сушку трансформатора по схеме тока нулевой последовательности (U_0 , I_0 , P_0 , $\cos\phi_0$) могут быть определены с достаточной точностью по паспортным данным и размерам трансформатора.

8. Применение форсированного нагрева трехфазных и однофазных трансформаторов при сушке приводит к экономии общего времени сушки (до 30%) и расхода электроэнергии (до 10%).

9. При сушке распределительных трансформаторов с прерывистым нагревом и использованием термодиффузии в циклах охлаждения общее время сушки остается практически неизменным, но при этом достигается суще-

ственная экономия электроэнергии, составляющая 20—40%.

10. Сушка распределительных трансформаторов по схеме тока нулевой последовательности в силу своих преимуществ заслуживает широкого внедрения в условиях сельской электрификации.

11. Исследуемые трансформаторы широко применяются не только в сельскохозяйственных сетях, но и в сетях других назначений (городских, коммунальных, в горнорудной промышленности и т. д.). Поэтому результаты работы могут быть использованы во всех отраслях народного хозяйства, где эксплуатируются эти трансформаторы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. А. А. Пястолов, Е. П. Попов. Сопротивления нулевой последовательности трансформаторов с алюминиевыми обмотками. Электрические станции, 1963 г., № 4.
2. А. А. Пястолов, Е. П. Попов. Технологические карты сушки силовых трансформаторов токами нулевой последовательности. Союзсельхозтехника, Москва, 1963 г.
3. Е. П. Попов, А. А. Пястолов. Сушка трансформаторов с алюминиевыми обмотками. Электрические станции, 1964 г., № 2.
4. Е. П. Попов, А. А. Пястолов. Тепловые режимы сушки трансформаторов с алюминиевыми обмотками. Труды ЧИМЭСХ, 1964 г., выпуск 15.
5. Е. П. Попов. Сушка распределительных однофазных трансформаторов токами нулевой последовательности. Труды ЧИМЭСХ, 1964 г., выпуск 18.
6. Е. П. Попов, А. А. Пястолов, Ю. Н. Банников. Исследование сушки силовых распределительных трансформаторов, выпускаемых Курганским ЭМЗ. Отчет о научно-исследовательской работе по договору с Курганским ЭМЗ, Челябинск, 1964 г.
7. Е. П. Попов, А. А. Пястолов, Ю. Н. Банников. Исследование сушки однофазных трансформаторов серии ОМС по схеме тока нулевой последовательности. Известия ВУЗов по разделу «Энергетика», 1964 г., № 11.
8. Ю. Н. Банников, Е. П. Попов. Сушка трансформаторов типа ОМС однофазным током. Энергетик, 1964 г., № 9.
9. Е. П. Попов. Сушка однофазных трансформаторов серии ОМС током нулевой последовательности. ГОСИНТИ, бюллетень технико-экономической информации, 1964 г., № 12.
10. Е. П. Попов. Определение электрических параметров сушки однофазных трансформаторов серии ОМС. Труды ЧИМЭСХ, 1965 г., выпуск 20.
11. Е. П. Попов. Температурный режим при сушке распределительных трансформаторов с алюминиевыми обмотками током нулевой последовательности. Вопросы электрификации сельского хозяйства, материалы научно-технического совещания, Минск, 1965 г.
12. Е. П. Попов. Сушка распределительных сельскохозяйственных трансформаторов по схеме тока нулевой последовательности. Сельскохозяйственное производство Урала, 1966 г., № 2.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ ДОКЛАДЫВАЛОСЬ:

- 1 На годовых научных конференциях Челябинского института механизации и электрификации сельского хозяйства в 1963, 1964 годах.
2. На республиканском научно-техническом совещании по электрификации сельского хозяйства, Белорусское республиканскоеправление НТОЭП, г. Минск, 1966 г.

Подписано к печати 31/V-66 г. ФБ14316. Формат бумаги 84×108/32.
уч. л. 1,23. Тираж 150 экз.

Обл. тип. Челяб. обл. управления по печати, г. Челябинск,
ул. Творческая, 127. Заказ 1793.