ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ, МАКСИМАЛЬНОГО ПЕРЕПАДА ТЕМПЕРАТУРЫ И ПОЛНОГО ТЕПЛОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРАХ

Л.А. Варданян, Э.В. Кургиян, П.О. Хачатрян

Национальный политехнический университет Армении

Обоснована актуальность оценки и регламентации тепловых режимов цилиндрических конденсаторов. Это обусловлено, с одной стороны, усилением тенденций к сокращению габаритов конденсаторов, с другой стороны - резким возрастанием удельного тепловыделения.

Возможны различные варианты параметров, характеризующих тепловые режимы конденсатора, допустимые превышения температуры корпуса конденсатора относительно температуры окружающей среды, максимальный перепад температуры, допустимые реактивную и активную мощности и др. Однако эти параметры не вполне удовлетворяют всем или отдельно предъявляемым требованиям, таким как независимость от вида и продолжительности воздействия электрической нагрузки, от активной рассеиваемой мощности конденсатора и др.

Проведенные в работе исследования показали, что наиболее рациональным параметром для регламентирования теплового режима конденсатора является полное тепловое сопротивление. Как известно, тепловым сопротивлением называется коэффициент пропорциональности между разностью температур двух изотермических поверхностей и тепловым потоком. Строгое определение теплового сопротивления конденсатора справедливо для постоянного теплового потока, протекающего между двумя изотермическими поверхностями, т.е. при отсутствии между ними стоков и истоков тепловой энергии.

Для цилиндрических конденсаторов коэффициент пропорциональности между превышением температуры и мощностью теплового потока в различных случаях эксплуатации также может быть принят в качестве теплового сопротивления, поскольку для оценки теплового режима неважно, является ли величина R_T истинным тепловым коэффициентом. Важно получить возможность определить превышение температуры конденсатора.

Ключевые слова: конденсатор, тепловой режим, полное тепловое сопротивление, перепад температуры.

Введение. Используем термин “эквивалентное тепловое сопротивление” или просто “тепловое сопротивление”, принятый применительно к большинству типов конденсаторов со следующими допущениями: 1) тепловое сопротивление

конденсатора линейно, т.е. не зависит от температуры в диапазоне, соответствующем рабочему перепаду температур в конденсаторе; 2) тепловое сопротивление не зависит от мощности тепловыделения и ее распределения по объему конденсатора; 3) мощность тепловыделения принимается не зависящей от температурных перепадов в конденсаторе.

Взаимосвязь между тепловыделением и превышением температуры конденсатора в общем случае определяется соотношением

$$\theta(t) = P(0) \cdot R_T(t) + \int_0^t P(\tau) R_T(t - \tau) d\tau, \quad (1)$$

где $\theta(t)$ - мгновенное значение превышения температуры внутри конденсатора над температурой окружающей среды; $R_T(t)$ - переходное полное тепловое сопротивление конденсатора; $P(\tau)$ - мощность тепловыделения.

Эквивалентная тепловая схема конденсатора приведена на рис. 1. Эта схема наиболее приемлема для описания переходных тепловых процессов в конденсаторе и регламентирования тепловых параметров в технической документации.

Рис. 1. Эквивалентная тепловая схема конденсатора

Выражение для переходного сопротивления конденсатора имеет вид

$$R_T(t) = R_T \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_T}} \right), \quad (2)$$

где $\tau_T = R_T \cdot C_T$ - эквивалентная тепловая постоянная времени конденсатора; R_T - установившееся значение переходного полного теплового сопротивления:

$$R_T = \lim_{t \rightarrow \infty} R_T. \quad (3)$$

Указанный закон изменения переходного теплового сопротивления $R_T(t)$ правомерен, строго говоря, лишь с момента наступления теплового равновесия или начиная с момента охлаждения. Теория регулирования температурных полей в телах с внутренними источниками тепла получила свое развитие в [1]. На стадии регулярного теплового режима температурное поле во всех точках тела изменяется по экспоненциальному закону. Автономность поля температур наступает независимо от характера начального распределения температуры и мощности источника тепла в теле.

Экспериментальные исследования и анализ конструкций конденсаторов малых и средних размеров показывают, что в случае равномерного распределения источников энергии по объему регуляризация температурного поля наступает быстро, т.е. можно рассматривать только регулярный тепловой режим [1]. В случае стационарного теплового режима уравнение (1) принимает вид

$$\theta = P \cdot R_T, \quad (4)$$

где θ - установившееся значение превышения температуры внутри конденсатора над температурой окружающей среды.

В качестве тепловой характеристики используется тепловое сопротивление, определенное при максимальном перегреве $\theta_{\max}$:

$$R_T = \frac{\theta_{\max}}{P}, \quad (5)$$

где R_T - полное тепловое сопротивление конденсатора, $град/Вт$; P - мощность тепловыделения в конденсаторе, $Вт$.

Для определения максимального перепада температуры внутри конденсатора, т.е. в самой горячей точке, воспользуемся выражением [2]

$$\theta = P_s \frac{D_a^2 - D_0^2}{16} \left[\frac{1}{\lambda} \cdot 1 - \left(\frac{D_0^2 - D_a^2}{\Delta\theta_w} \right) \ln \frac{D_a^2}{D_0^2} + \frac{2}{\lambda} \cdot \frac{D - D_a}{D_a} + \frac{4}{\beta D} \cdot \frac{b_a}{H + D/4} \right], \quad (6)$$

где P_s - удельные объемные потери, $Вт/см^3$; D_a - диаметр активной зоны конденсатора, $см$; D_0 - диаметр намоточной оправки, $см$; D - внешний диаметр конденсатора, $см$; λ - коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности конденсатора, $Вт/см^2 \cdot град$; β - коэффициент теплопроводности диэлектрика, $Вт/см \cdot град$; H - высота конденсатора, $см$; $\Delta\theta_w$ - температурный перепад активной зоны, $град$; $\Delta\theta_E$ - перепад корпусной изоляции, $град$; $\Delta\theta_0$ - перепад корпуса, $град$; b_a - активная ширина конденсатора, $см$.

В качестве тепловой характеристики используется тепловое сопротивление, определенное при максимальном перегреве:

$$R_T = \frac{\theta_{\max}}{PV_a}, \quad (7)$$

где $\theta_{\max} = t_{\max} - t_0$ - максимальный перепад температуры конденсатора относительно температуры окружающей среды; V_a - объем активной зоны, см^3 .

Методы исследования. Для решения задачи теплопроводности цилиндрических силовых конденсаторов принимаем тепловую модель, представленную на рис. 2, с учетом тех соображений, что в общем виде эти конденсаторы можно представить как полые, двуслойные, ограниченные по высоте цилиндра, во внутреннем слое которых имеется равномерно распределенный источник тепла.

Рис. 2. Тепловая модель цилиндрического конденсатора

В тепловом отношении объем такого конденсатора делится на четыре зоны:

- 1) зона D_0 - объем в центре конденсатора, где тепловыделение отсутствует. Эта зона нагревается только за счет теплопроводности от окружающей ее зоны D_1 ;
- 2) зона D_1 - активная зона конденсатора, представляющая полый цилиндр. В

этой зоне имеются равномерно распределенные источники тепла с интенсивностью тепловыделения

$$P_s = \frac{Q \operatorname{tg} \delta}{V_a}, \quad (8)$$

где Q - реактивная мощность конденсатора; $\operatorname{tg} \delta$ - тангенс угла потерь конденсатора; V_a - объем активной зоны (зона D_1).

Зона D_1 в осевом направлении ограничивается плоскостями $Z = \pm \ell_z$ и граничит с зоной D_3 ; 3) зона D_2 - объем, занимаемый корпусной изоляцией и корпусом в виде цилиндрической оболочки, где тепловыделение отсутствует, омывается с наружной поверхности окружающей средой.

Температурное поле во всех случаях приводится для избыточной температуры

$$\theta = t - t_0, \quad (9)$$

где $t_0 = \text{const}$ - температура окружающей среды;

4) зона D_3 - объем, занимаемый изоляцией и корпусом с торцов в виде цилиндрических дисков, тепловыделение в которых отсутствует, омывается с внешней стороны окружающей средой.

По своим теплофизическим параметрам все рассматриваемые зоны анизотропны в направлении координатных осей. В качестве теплофизических параметров (удельная теплопроводность, теплоемкость и плотность) при определении температурных полей принимаются их эквивалентные величины по каждому направлению.

Для сокращения объема вычислений принимаем следующие допущения: 1) все теплофизические характеристики материалов, применяемых в конденсаторах в рабочем диапазоне температур ($-50 \dots +100$ °C), не зависят от температуры. По данным [3], такое упрощение допустимо; 2) так как тепловые сопротивления зон D_0 и D_2 в аксиальном направлении и зоны D_3 в радиальном направлении во много раз больше соответственно сопротивлений в радиальном (для зон D_0 и D_2) и аксиальном (для зоны D_3) направлениях, поэтому принимаем для указанных зон одномерную задачу теплопроводности.

Результаты исследования. Рассмотрим коммутирующий конденсатор с комбинированными обкладками (фольга и двусторонняя металлизированная бумага). Схема намотки секции конденсатора приведена на рис. 3.

Рис. 3. Схема намотки секции конденсатора

Конденсатор состоит из двух секций по 5 мкФ , соединенных параллельно. Определим диаметр активной зоны по формуле

$$D_a = \sqrt{D_0^2 + kC}, \quad (10)$$

где k - коэффициент намотки, который определяется по формуле [3],

$$k = \frac{0,144(d + d_0)d}{\varepsilon \cdot b_a \cdot k_1}, \quad (11)$$

где d - толщина полипропиленовой пленки, равная 10 мкм ; d_0 - толщина обкладок, равная 8 мкм ; ε - диэлектрическая проницаемость полипропиленовой пленки; b_a - активная ширина секции, равная $4,1 \text{ см}$; k_1 - коэффициент запрессовки, равный $0,95$.

Определим по формулам (10), (11) диаметры активной зоны D_a корпусной изоляции и корпуса D_2 (пренебрегая падением температуры на корпусе.)

По формуле (6) рассматриваем максимальные перепады температуры при различных диаметрах намоточной оправки D_0 . Определим удельное объемное сопротивление по формуле

$$\rho = \frac{\theta_{\max}}{P_s}. \quad (12)$$

Результаты расчетов по формулам (7), (8), (10)-(12) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Расчетные результаты секции оправки при различных D_0 диаметрах

D_0 , см	D_a , см	D , см	$\theta_{\max}$, град·°C	ρ_T , Вт/см ³	V_a , см ³	P_s , Вт/см ³	R_T
1	7,11	7,47	94,860	3759,885	1,245	0,2523	3,0210
1,6	7,22	7,58	88,535	3509,196			2,8196
3	7,65	8,01	72,840	2887,075			2,3197
4	8,10	8,46	62,658	2483,503			1,9955
5	8,63	8,99	53,898	2136,288			1,7165
6	9,25	9,61	46,560	1845,441			1,4828
7	9,93	10,29	40,483	1604,573			1,2893
8	10,66	11,02	35,463	1405,628			1,1294
10	12,23	12,59	27,849	1103,837			0,8869

Имея значение удельного теплового сопротивления и задаваясь значением допустимого перепада температуры, равным $[\theta_{\max}]_p = 40^\circ\text{C}$, при температуре окружающей среды $t_0 = 50^\circ\text{C}$ можно определить допустимую реактивную мощность конденсатора в зависимости от диаметра намоточной оправки D_0 :

$$Q = \frac{[\theta_{\max}]_p \cdot V_a}{\rho_T \cdot \operatorname{tg} \delta}, \quad (13)$$

где Q - допустимая реактивная мощность, кВАр; $[\theta_{\max}]_p$ - максимально допустимый перепад температуры, °C; V_a - активный объем конденсатора, см³; ρ_T - удельное сопротивление активной зоны, Вт/см³; $\operatorname{tg} \delta$ - тангенс угла диэлектрических потерь конденсатора.

Результаты расчета приведены в табл. 2 [4]. Результаты расчета получены по формуле (13).

Таблица 2

Расчетные результаты секции оправки при различных D_0 диаметрах для получения максимальной удельной мощности

D_0 , см	V_k , дм ³	$\Delta\theta_W$, °C	$\Delta\theta_E$, °C	$\Delta\theta_0$, °C	Q , кВАр	q кВАр/дм ³
1	2	3	4	5	6	7
1	1,353	63,33	4,74	14,84	26,4811	18,894
1,6	1,394	58,20	4,68	14,61	28,3728	19,667
3	1,56	45,80	4,43	13,8	34,4867	21,390

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7
4	1,741	38,04	4,2	13,0	40,0909	22,320
5	1,974	31,56	3,95	12,21	46,6069	22,937
6	2,257	26,28	3,7	11,4	53,9523	23,261
7	2,591	22,0	3,46	10,6	62,0513	23,343
8	2,977	18,6	3,23	9,85	70,8337	23,238
10	3,899	13,61	2,83	9,53	90,1997	22,658

Из табл. 2 видно, что максимальная удельная мощность наступает при $D_0 = 6$ см (увеличение составляет 20%), а мощность конденсатора увеличивается в два раза [4].

Закключение. Таким образом, на основе результатов экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Максимальная удельная мощность конденсатора наступает при $D_0 = 6$ см (увеличение составляет 20%), а мощность конденсатора увеличивается в два раза.
2. Анализ конструкции конденсаторов малых и средних размеров показывает, что в случае равномерного распределения источников энергии по объему регулирование температурного поля наступает быстро, т.е. можно рассматривать только регулярный тепловой режим.
3. Экспериментальные исследования конденсатора показывают, что наиболее удачной характеристикой теплового режима является полное тепловое сопротивление конденсатора.

Литература

1. Теория тепломассообмена / **С.И. Исаев, И.А. Кожин, В.И. Кофанов и др.**: Учебник для вузов; Под ред. А.И. Леонтьева. - 3-е изд. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. - 462 с.
2. Kondensatoren für die Energie - Elektronik. - Datenbuch 1979/80, Siemens. - 548 p.
3. **Ренне В.Т.** Электрические конденсаторы. - Л.: Энергия, 1969. - 592 с.
4. Արտոնագիր №3374Ա, ՊՄԴ H01G 3/00. Ուժային ինքնավերականգնվող կոնդենսատոր / **Պ.Հ. Խաչատրյան, Է.Վ. Կուրդինյան, Լ.Ա. Վարդանյան**. - Հրապարակված է 16.03.2020թ.:

Поступила в редакцию 15.04.2021.
Принята к опубликованию 15.07.2021.

**ԳԼԱՆԱՅԻՆ ԿՈՆԴԵՆՍԱՏՈՐՆԵՐՈՒՄ ՋԵՐՄԱՅԻՆ ԴԱՇՏԻ, ՋԵՐՄԱՍՏԻՃԱՆԻ
ԱՌԱՎԵԼԱԳՈՒՅՆ ԱՆԿՄԱՆ ԵՎ ԼՐԻՎ ՋԵՐՄԱՅԻՆ ԴԻՄԱԴՐՈՒԹՅԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ**

Լ.Ա. Վարդանյան, Է.Վ. Կուրդինյան, Պ.Հ. Խաչատրյան

Կոնդենսատորների ջերմային ռեժիմների գնահատումը և կարգավորումը հատկապես արդիական են մի կողմից՝ զանգվածաչափների կրճատման միտումներով և մյուս կողմից՝ տեսակարար ջերմանջատման կտրուկ աճով պայմանավորված:

Գոյություն ունեն կոնդենսատորի ջերմային ռեժիմները բնութագրող պարամետրերի բազմազան տարբերակներ՝ կոնդենսատորի իրանի ջերմաստիճանի թույլատրելի բարձրացումը շրջակա միջավայրի ջերմաստիճանի նկատմամբ, ջերմաստիճանի առավելագույն անկումը, թույլատրելի ռեակտիվ և ակտիվ հզորությունը և այլն: Այս պարամետրերը լիովին չեն բավարարում բոլոր կամ առանձին առաջադրվող պահանջները, ինչպիսին է անկախությունը՝ կախված էլեկտրական բեռի տեսակից և տևողությունից, կոնդենսատորի ակտիվ ցրված հզորությունից և այլն:

Ուսումնասիրությունները ցույց են տվել, որ կոնդենսատորի ջերմային ռեժիմի կարգավորման համար առավել ռացիոնալ պարամետր է ջերմային դիմադրությունը: Ջերմային դիմադրության ճշգրիտ որոշումը նպատակահարմար է հաստատուն ջերմային հոսքի դեպքում, որը հոսում է երկու իզոթերմային մակերևույթների միջև, այսինքն՝ դրանց միջև ջերմային էներգիայի հոսքերի և արտահոսքերի բացակայության դեպքում:

Բարձրացված ջերմաստիճանով և ջերմային հոսքի հզորության միջև կոնդենսատորների համեմատական գործակիցը շահագործման տարբեր դեպքերում կարող է ընդունվել նաև որպես ջերմային դիմադրություն, քանի որ ջերմային ռեժիմը գնահատելու համար կարևոր չէ՝ արդյոք R_T -ն հանդիսանում է իրական ջերմային գործակից: Կարևոր է հնարավորություն ունենալ՝ որոշելու կոնդենսատորի ջերմաստիճանի բարձրացումը:

Առանցքային բաներ. կոնդենսատոր, ջերմային ռեժիմ, լրիվ ջերմային դիմադրություն, ջերմաստիճանի անկում:

**STUDYING THE HEAT FIELD, THE MAXIMUM TEMPERATURE DIFFERENCE
AND THE TOTAL THERMAL RESISTANCE IN CYLINDRICAL CAPACITORS**

L.A. Vardanyan, E.V. Kurghinyan, P.H. Khachatryan

The urgency of assessing and regulating the thermal regimes of cylindrical capacitors is substantiated. This is conditioned on the one hand by increasing the tendency of reduction of the capacitor sizes, and on the other hand, by sharply increasing the specific heat release.

There are various options for the parameters, characterizing the thermal conditions of the capacitor: the permissible excess of the temperature of the capacitor body relative to the ambient temperature; the maximum temperature difference, the permissible reactive and active power, etc. However, these parameters do not fully satisfy all or separately imposed requirements, such as independence from the type and duration of exposure to electrical load, and from the active dissipated power of the capacitor, etc.

The studies carried out in the work have shown that the most rational parameter for regulating the thermal regime of a capacitor is resistance. As it is known, thermal resistance is the coefficient of proportionality between the temperature difference of two isothermal surfaces

and the heat flux. The strict definition of thermal resistance is valid for a constant heat flux flowing between two isothermal surfaces, i.e. in the absence of sinks and sources of thermal energy between them.

For cylindrical capacitors, the proportionality coefficient between the temperature rise and the heat flux power, in various cases of operation, can also be taken as the thermal resistance, since for evaluating the thermal regime, it is not important whether the value R_T is a true thermal coefficient. It is important to have an opportunity to determine the temperature rise of the capacitor.

Keywords: capacitor, thermal mode, total thermal resistance, temperature drop.