

# РАСЧЕТ СИЛОВОГО КОНДЕНСАТОРА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК ЧАСТОТОЙ 50 Гц

Задание:

- 1) определить емкость конденсатора для сети заданного класса напряжения частотой 50 Гц и требуемой реактивной мощности;
- 2) определить число последовательно включенных секций по характеристикам диэлектрических материалов и рабочему напряжению конденсатора;
- 3) определить размеры и число параллельных секций конденсатора;
- 4) рассчитать удельные потери в секциях конденсатора.

## ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ

Конденсатор - это устройство, имеющее два или более проводника (обкладки), разделенные электрической изоляцией, и предназначенное для использования его электрической емкости. Одной из многих разнообразных задач, решаемых с применением конденсаторов, является повышение коэффициента мощности электроустановок. Принципиальная электрическая схема конденсатора исключительно проста. Вместе с тем, достижение высоких эксплуатационных характеристик (удельной емкости, удельной энергии и др.) требует знания свойств электротехнических материалов и умения правильно конструировать изоляцию. Без соответствующих расчетов удельная энергия силовых конденсаторов может отклоняться на несколько порядков. Она зависит от выбранного изоляционного материала, принятого режима работы конденсатора и требуемого срока его эксплуатации.

Расчет конденсатора обычно включает в себя следующие этапы:

- 1) выбор электроизоляционного материала;
- 2) выбор рабочей напряженности поля;
- 3) расчет толщины изоляции и числа последовательно включенных секций, представляющих собой самостоятельные диэлектрические конструкции, обладающие электрической емкостью и являющиеся основой построения конденсатора;
- 4) определение размеров и числа параллельных секций;
- 5) компоновка секций;
- 6) выбор защиты от атмосферных воздействий;
- 7) расчет температуры в изоляции конденсатора;
- 8) определение срока службы конденсатора при заданной вероятности безотказной работы;
- 9) уточнение размеров конденсатора.

В рамках курсовой работы студентам требуется выполнить лишь часть перечисленных выше этапов расчета конденсатора, а именно, требуется:

- 1) рассчитать емкость конденсатора;
- 2) определить число последовательно включенных секций;
- 3) рассчитать число и размеры параллельных секций;
- 4) вычислить диэлектрические потери и потери в обкладках конденсатора.

Расчет требуется провести в приложении к конденсатору с бумажно-трихлордифениловой изоляцией, предназначенному для работы в электроустановках с классом напряжения  $U_n$  и имеющему реактивную мощность  $Q$ . Конденсатор состоит из 3-х сборок секций, которые соединяются между собой в звезду или в треугольник. Бумага, используемая в изоляции между обкладками конденсатора, имеет толщину  $b_1$ , а число ее слоев между обкладками равно  $n_1$ . Рабочая напряженность поля равна  $E_{\text{раб}}$ .

Таблица 2.1

Класс напряжения, $U_n$ , кВ	3	6	10	15	20	35	110	150	220	330	500
Наибольшие рабочие напряжения электрооборудования $U_{\text{раб}}$ , кВ	3.6	7.2	12	17.5	24	40.5	126	172	252	363	525

Емкость конденсатора следует рассчитывать по классу напряжения электроустановки  $U_n$ , а определение характеристик изоляции следует проводить по наибольшему рабочему напряжению  $U_{\text{раб}}$ . Класс напряжения равен номинальному линейному напряжению сети. Величина  $U_{\text{раб}}$  устанавливается для каждого класса напряжения. Она равна предельному значению напряжения, которое изоляция в электроустановках должна выдерживать в течение неограниченного времени воздействия. Величина наибольшего напряжения  $U_{\text{раб}}$ , как и величина  $U_n$ , является линейным напряжением и определяется стандартом. Ниже, в таблице 2.1, приведены значения  $U_n$  и соответствующие им  $U_{\text{раб}}$ .

## Расчет емкости конденсатора

При соединении сборных секций конденсатора в треугольник на каждую из них будет действовать линейное напряжение. Тогда требуемая емкость одной сборки  $C_{сб}$  может быть найдена из следующей формулы реактивной мощности:

$$Q_{\Delta} = 3 U_{H}^2 \omega C_{сб\Delta} \quad (2.1)$$

При соединении сборок в звезду реактивная мощность конденсатора равна:

$$Q_{*} = 3 (U_{H} / \sqrt{3})^2 \omega C_{сб*} = U_{H}^2 \omega C_{сб*} \quad (2.2)$$

Из формул (2.1) и (2.2) следуют выражения для соответствующих

емкостей  $C_{сб\Delta}$  и  $C_{сб*}$ .

Они равны:

$$C_{сб\Delta} = \frac{Q_{\Delta}}{3 U_{H}^2 \omega} \quad (2.3)$$

и

$$C_{сб*} = Q_{*} / U_{H}^2 \omega \quad (2.4)$$

Здесь  $\omega = 2\pi f$  - угловая частота напряжения в сети ( $f$  - частота напряжения, обычно равная 50 Гц).

При рассмотрении следующих этапов расчетов необходимо учитывать способ соединения сборных секций, мы далее для определенности будем полагать, что сборки секций конденсатора соединены в треугольник. Однако это не отразится ни на порядке расчета, ни на используемых при его проведении формулах.

## Определение числа последовательно включенных секций

Для заданной толщины бумаги  $\delta_1$ , и принятого числа ее слоев  $n_1$

между обкладками конденсатора можно по расчетной рабочей напряженности поля  $E_{раб}$ , характерной для заданного типа изоляционной конструкции, найти расчетное число последовательно включенных секций

$n_{\text{посл.р.}}$ . Оно равно:

$$n_{\text{посл.р.}} = U_{\text{раб}} / E_{\text{раб}} \cdot n_1 \delta_1 \quad (2.5)$$

Число  $n_{\text{посл.р.}}$ , найденное по формуле (2.5), следует затем принять равным ближайшему целому числу. Замена расчетного числа  $n_{\text{посл.р.}}$  ближайшим целым числом  $n_{\text{посл.}}$  требует соответствующего пересчета величины  $E_{\text{раб.}}$  по формуле

$$E_{\text{раб.}} = U_{\text{раб}} / n_{\text{посл.}} \cdot n_1 \delta_1 \quad (2.6)$$

Тогда с учетом  $E_{\text{раб.}}$  рабочее напряжение отдельной секции  $U_{\text{с. раб.}}$  будет равно:

$$U_{\text{с. раб.}} = E_{\text{раб.}} \cdot n_1 \delta_1 \quad (2.7)$$

### Расчет размеров и числа параллельных секций

Отдельная секция конденсатора с бумажно-жидкостной изоляцией обычно представляет собой рулон из двух фольговых электродов, между которыми укладывается несколько слоев бумаги (или пленки). Оптимальным считается размещение между электродами 6-10 слоев бумаги. Сначала фольга и бумага вместе сворачиваются в круглые рулоны, а затем они спрессовываются в овальные секции. Толщина спрессованной секции обозначается  $\Delta c$ ; длина секции, обозначаемая  $b$ , примерно равна ширине фольги, а ширина секции обозначается  $h$ . По заданным в задании величинам  $\Delta c$ ,  $b$  и  $h$  определим длину закраин  $AL$ , т.е. линейный размер, на который изоляционный материал выступает за край одной из обкладок конденсатора для предотвращения ее контакта с другой обкладкой или перекрытия по поверхности диэлектрика. Она находится по формуле:

$$\Delta L = k_3 U_{\text{исп.с.}} + L_1 \quad (2.8)$$

где  $k_3$  - коэффициент закраины; при работе секции в жидком диэлектрике он принимается равным  $k_3 = 1,5 - 2,5$  м/МВ (при проведении расчетов принять  $k_3$  равным 1,5 м/МВ);

$U_{\text{исп.с.}}$  - испытательное напряжение, приходящееся на одну секцию конденсатора;  $L_1$  - технологическое увеличение размера закраин, обусловленное возможным смещением обкладок относительно изолирующей бумаги при изготовлении секций; величина  $L_1$  выбирается в зависимости от технологии изготовления конденсаторов в пределах от 0,5 до 10 мм (в расчетах принять  $L_1 = 5$  мм).

Величина испытательного напряжения секции  $U_{\text{исп.с.}}$  определяется по испытательному напряжению всего конденсатора  $U_{\text{исп.к.}}$ , которое примем равным  $2,2 U_{\text{раб.}}$ , тогда

$$U_{\text{исп.с.}} = 2,2 U_{\text{раб.}}/n_{\text{посл.}} \quad (2.9)$$

С учетом (2.9) по выражению (2.8) величина закраин  $\Delta L$  равна:

$$\Delta L = (2,2 U_{\text{раб.кз}}/n_{\text{посл.}}) + L_1 \quad (2.10)$$

Относительную диэлектрическую проницаемость изоляционной бумаги, пропитанной трихлордифенилом, находим по формуле:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_{\text{г.пр.}}}{1 + \frac{\gamma_{\delta}}{\gamma_{\kappa}} K_{\text{запр.}} \left( \frac{\epsilon_{\text{г.пр.}}}{\epsilon_{\text{г.к.}}} - 1 \right)} \quad (2.11)$$

где  $\epsilon_{\text{г.пр.}}$  и  $\epsilon_{\text{г.к.}}$  - относительные диэлектрические проницаемости

соответственно пропитывающего состава (трихлордифенила) и клетчатки (бумаги, поры которой пропитаны жидким диэлектриком);

$\gamma_{\delta}$  и  $\gamma_{\kappa}$  - соответственно плотность бумаги и плотность клетчатки;

$K_{\text{запр.}}$  - коэффициент запрессовки.

Коэффициент запрессовки  $K_{\text{запр.}}$  учитывает изменение толщины изоляции в результате прессования цилиндрических заготовок отдельных секций и превращения их в овальные. В принятой для расчета диэлектрической конструкции конденсатора коэффициент  $K_{\text{запр.}}$  равен:

$$K_{\text{запр.}} = n_1 \delta_1 / \Delta_{\text{из.}} \quad (2.12)$$

где  $n_1 \delta_1$  - толщина бумаги между обкладками;

$\Delta_{\text{из.}} = \Delta_1 + \Delta_2$  - полная толщина изоляции, которая включает в себя толщину клетчатки  $\Delta_1$ , и толщину пропитывающего слоя  $\Delta_2$ .

При этом толщина клетчатки равна:

$$\Delta_1 = n_1 \delta_1 (\gamma_{\delta} / \gamma_{\kappa}) \quad (2.13)$$

а толщина пропитывающего слоя может быть найдена из выражения:

$$\Delta_2 = n_1 \delta_1 (1 - (\gamma_\delta / \gamma_k) K_{\text{запр.}}) / K_{\text{запр.}} \quad (2.14)$$

Обычно коэффициент запрессовки  $K_{\text{запр.}}$  составляет величину от 0,8 до 0,95. В рамках данной курсовой работы примем его равным величине, определенной индивидуальным заданием без - проведения соответствующих вычислений. Примем также, что в качестве конденсаторной бумаги используется бумага КОН-1, плотность которой  $\gamma_\delta$  составляет  $1000 \text{ кг/м}^3$ . Плотность клетчатки  $\gamma_k$  следует принять равной  $1550 \text{ кг/м}^3$ , а ее относительная диэлектрическая проницаемость равна  $\epsilon_{\text{г.к.}} = 6,6$ . Учитывая, что диэлектрическая проницаемость пропитывающего жидкого диэлектрика (трихлордифенила) составляет величину  $\epsilon_{\text{г.пр}} = 5,0$ , можно по формуле (2.11) провести расчет диэлектрической проницаемости всей изоляции отдельной секции конденсатора  $\epsilon_r$ .

Далее следует определить расчетную электрическую емкость отдельной секции  $C_{\text{с.р.}}$ , а по ней - расчетное число параллельных секций, необходимых для создания в каждой фазной сборке требуемой емкости  $C_{\text{сб.р.}}$ .

Емкость отдельной секции равна:

$$C_{\text{с.р.}} = \epsilon_r \epsilon_0 (b - 2\Delta L) (h - \Delta_c + \pi/4 \Delta_c K_3) \Delta_c K_3^2 / n_1 \delta_1 (n_1 \delta_1 + \Delta_\phi) \quad (2.15)$$

где  $\Delta_\phi$  - толщина фольги, определяемая индивидуальным заданием по курсовой работе;

$\epsilon_0$  - электрическая постоянная ( $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ ).

Расчетное число параллельных секций сборки  $n_{\text{пар.р.}}$ , позволяющих получить требуемую емкость  $C_{\text{сб.}}$ , найдем по формуле:

$$N_{\text{пар.р.}} = C_{\text{сб.}} n_{\text{посл.}} / C_{\text{ср.}} \quad (2.16)$$

Результат, полученный по формуле (2.16), следует округлить до ближайшего целого числа, т.е. принять  $n_{\text{пар.р.}} = n_{\text{пар.}}$ . Тогда требуемая емкость отдельной секции тоже должна быть изменена в соответствии с принятым округленным значением числа параллельных секций  $n_{\text{пар.}}$ . Новое значение  $C_c$  получим из выражения:

$$C_c = C_{\text{сб.}} n_{\text{посл.}} / n_{\text{пар.}} \quad (2.17)$$

Чтобы получить требуемую емкость  $C_c$  необходимо изменить один из параметров секции, определяющих ее величину. Изменим толщину секции  $\Delta_c$  на новое значение  $\Delta_c^*$ . Величину  $\Delta_c^*$  можно вычислить по выражению (2.15), преобразовав его к квадратному уравнению относительно искомой величины  $\Delta_c^*$  и взяв положительный корень в его решении.

## ВЫЧИСЛЕНИЕ УДЕЛЬНЫХ ПОТЕРЬ В СЕКЦИЯХ КОНДЕНСАТОРА.

Все потери энергии в конденсаторе состоят из диэлектрических потерь и потерь от тока, протекающего в обкладках. Оба вида потерь зависят от температуры материалов конденсатора. Поэтому при расчете потерь необходимо задаться температурой в середине спрессованной секции. Выберем три уровня этой температуры: +70, +40 и +10 °С. Следует принять, что при этих температурах величина тангенса угла диэлектрических потерь составит соответственно:  $\text{tg}\delta_{70}=0,0023$ ;  $\text{tg}\delta_{40}=0,0019$ ;  $\text{tg}\delta_{10}=0,0021$ .

Расчет электрических потерь в отдельной секции следует провести по формуле:

$$P_{gt} = U_{c, \text{раб.}}^2 \omega C_c \text{tg}\delta_t \quad (2.18)$$

где  $P_{gt}$  - диэлектрические потери в изоляции при температуре  $t_0$ ;

$U_{c, \text{раб.}}$  - приложенное к изоляции наибольшее рабочее напряжение на секции;

$\omega$  - угловая частота;

$C_c$  - емкость изоляции отдельной секции;

$\text{tg}\delta_t$  - тангенс угла диэлектрических потерь при температуре  $t$ .

Таким образом, в расчетах следует принять, что приложенное к секции напряжение равно наибольшему рабочему напряжению  $U_{\text{сраб.}}$  и не зависит от времени. Нагревом изоляции от воздействия случайных перенапряжений можно пренебречь из-за их малой продолжительности и сравнительно редкого появления.

Емкость электроизоляционной конструкции с некоторыми можно считать не зависящей от времени и температуры. Вместе с тем, температура изоляции, а также частота переменного тока оказывают существенное влияние на  $\text{tg}\delta_t$ .

Поэтому при подсчете диэлектрических потерь значение  $\text{tg}\delta_t$  должно соответствовать определенной температуре и частоте переменного тока. При вычислениях будем предполагать, что напряжение в сети синусоидально и имеет частоту 50 Гц, а высшие гармоники в его составе отсутствуют. Тогда при расчетах по формуле (2.17) будет варьировать только величина  $\text{tg}\delta_t$ , для трех значений которой получим три значения мощности  $P_{g70}$ ,  $P_{g40}$ ,  $P_{g10}$ .

Потери в обкладках для каждой из температур найдем по формуле:

$$P_{\phi t} = 1/6 (U_c \omega C_c / n)^2 * (L_a / (b - 2\Delta L)) \Delta_{\phi} * \rho_0 * (1 + 2\alpha_{\phi}(t - t_0)) \quad (2.19)$$

где  $L_a$ , - активная длина обкладки секции (см. ниже);

$n$  - число закладных отводов от одной обкладки секции, располагаемой на равном расстоянии друг от друга (в расчетах  $P_{\phi t}$  принять  $n=1$ );

$\rho_0$  - удельное сопротивление материала обкладок при температуре  $t_0$ ;

$\alpha_{\phi}$  - температурный коэффициент сопротивления материала обкладок.



Активная длина обкладок  $L_a$  находится по величине емкости секции  $C_c$  из выражения:

$$L_a = C_c \Delta_{из} / 2 \varepsilon_r \varepsilon_0 (b - 2\Delta L) \quad (2.20)$$

Или по формуле (2.21), полученной из (2.20) с учетом геометрических и других характеристик секции, найденных в результате предыдущих расчетов:

$$L_a = \frac{\Delta_c^* k_3}{2(n_1 \delta_1 + \Delta_\phi)} \left( h - \Delta_c^* + \frac{\pi}{3} \Delta_c^* k_3 \right) \quad (2.21)$$

Величины  $\rho_0$  и  $\alpha_\phi$  необходимые для вычисления потерь в фольге  $P_{\phi t}$ ,

приведены в задании.

Суммарные потери, имеющие место в отдельной секции конденсатора при температурах 70, 40 и 10 °С, определяются суммированием  $P_{gt}$  и  $P_{\phi t}$ :

$$P_{ct} = P_{gt} + P_{\phi t} \quad (2.22)$$

Совокупные потери во всех секциях конденсатора получим по формуле:



















$$P_{кт} = n_{посл} \cdot n_{пар} \cdot P_{ct} \quad (2.23)$$

Удельные тепловыделения в секции, т.е. тепловыделения в единице объема секции найдем из выражения:

$$q_{ct} = P_{ct} / (b - 2\Delta L) h \Delta_c \quad (2.24)$$

Этим расчет потерь в секциях конденсатора заканчивается.

### ВАРИАНТЫ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ

№ варианта задания	Класс напряжения - U <sub>н</sub> , кВ	Требуемая реактивная мощность, Q, кВАр	. Способ соединения сборных секций	Изоляция между обкладками конденсатора			Геометрические размеры спрессованной секции			Коэффициент Запресовки секций, K <sub>запр.</sub>	Характеристики фольги		
				Толщина изолирующей бумаги δ, мкм.	Число слоев бумаги n <sub>1</sub>	Расч. раб. напряж. н-ности поля, E <sub>рас.в.</sub> МВ/М	Толщина секции Δ с мм	Длина секции, Б, мм	Ширина секции, h, мм		Толщина фольги Δ φ, мкм	Уд.сопротивл. материала, ρ <sub>о</sub> , Ом*м.	Температ.коэф. материала фольги, α <sub>ф</sub> , Ом*м/гра
1	6,3	75		12	6	14	20	280	160	0,9	8	28*10 <sup>-9</sup>	0,0042
2	10,0	75		10	8	13	25	300	165	0,9	10	28*10 <sup>-9</sup>	0,0041
3	6,0	50		10	7	13	20	250	155	0,9	12	27*10 <sup>-9</sup>	0,0043
4	2,0	50		10	10	14	25	250	175	0,85	10	27*10 <sup>-9</sup>	0,0042
5	3,0	40		10	7	12	20	200	180	0,85	12	29*10 <sup>-9</sup>	0,0040
6	10,0	40		10	10	14	23	220	170	0,85	10	29*10 <sup>-9</sup>	0,0041
7	6,3	85		12	6	12	22	280	155	0,92	8	28*10 <sup>-9</sup>	0,0040
8	3,0	45		12	6	12	23	260	160	0,86	10	27*10 <sup>-9</sup>	0,0042
9	10,0	70		12	7	13	22	300	165	0,86	12	26*10 <sup>-9</sup>	0,0043
10	15,0	75		12	8	15	25	300	180	0,92	8	26*10 <sup>-9</sup>	0,0044
11	35,0	50		12	10	14	23	260	175	0,88	10	27*10 <sup>-9</sup>	0,0044
12	6,0	70		12	8	13	21	280	170	0,88	12	28*10 <sup>-9</sup>	0,0041
13	3,0	45		10	8	12	22	210	160	0,91	10	28*10 <sup>-9</sup>	0,0042
14	10,0	40		10	9	14	20	220	155	0,87	8	29*10 <sup>-9</sup>	0,0041
15	20,0	35		12	10	13	24	230	155	0,85	8	26*10 <sup>-9</sup>	0,0044
16	10,0	45		10	9	12	24	240	180	0,91	10	27*10 <sup>-9</sup>	0,0042
17	35,0	35		10	10	15	24	200	160	0,90	10	27*10 <sup>-9</sup>	0,0042
18	35,0	70		12	9	14	24	210	170	0,91	12	28*10 <sup>-9</sup>	0,0043

## **7 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ КУРСОВОЙ РАБОТЫ,**

1. В чем суть процесса поляризации диэлектриков? Какие виды поляризации можно выделить и в чем их отличие друг от друга с энергетической точки зрения? Что называется относительной диэлектрической проницаемостью диэлектриков?
2. Опишите процессы упругой поляризации, а также процессы дипольной, миграционной и сегнетоэлектрической поляризации. Какие виды поляризации имеют место в изоляции рассчитываемого Вами конденсатора? В каком виде поляризации величина относительной диэлектрической проницаемости будет больше?
3. Что называется электропроводностью диэлектриков? Как оценивается электропроводность диэлектрических материалов и конструкций? Что называют током абсорбции и является ли он результатом электропроводности диэлектрика?
4. Чем обусловлены потери в изоляционной конструкции? Приведите схему замещения и объясните роль каждого ее элемента в описании процессов поляризации электропроводников.