

*Елисеева Анастасия Александровна, старший преподаватель
кафедры «Физики, электротехники и электроэнергетики»*

Институт сервиса, туризма и дизайна (филиал) СКФУ

Россия, г. Пятигорск

*Палий Владимир Алексеевич, старший преподаватель
кафедры «Физики, электротехники и электроэнергетики»*

Институт сервиса, туризма и дизайна (филиал) СКФУ

Россия, г. Пятигорск

*Щикунов Николай Николаевич, студент 4 курса
кафедры «Физики, электротехники и электроэнергетики»*

Институт сервиса, туризма и дизайна (филиал) СКФУ

Россия, г. Пятигорск

РАСЧЁТ ИНДУКТИВНОСТИ ВЧ ЗАГРАДИТЕЛЯ

***Аннотация:** Появление линий электропередач ещё в начале прошлого века подтолкнуло инженерную мысль к одновременной организации на них каналов связи. Низкие затраты на сооружение и эксплуатацию каналов высокочастотной связи по высоковольтным линиям и высокая надёжность обусловили их широкое распространение в энергосистемах большинства стран мира. И каких бы успехов не достигала беспроводная связь, ей невозможно будет конкурировать с оперативной и надёжной связью по высоковольтным проводам для нужд релейной защиты, т.е. создаваемой специально для нужд энергетики и обслуживаемой её персоналом. Организация каналов ВЧ связи по ВЛ не является темой данного исследования, и мы рассматриваем ее как часть высокочастотных заградителей. Высококачественные заградители - основные элементы высокочастотных каналов связи.*

***Ключевые слова:** ВЧ заградитель, соленоид, индуктивность.*

***Annotation:** The appearance of power lines at the beginning of the last century has pushed the engineering idea to the simultaneous organization of communication channels on them.*

Low cost of construction and operation of high-frequency communication channel to high-voltage lines and high reliability caused their widespread use in power systems in the world.

Moreover, no matter what progress has been made by wireless communication, it will be impossible to compete with the rapid and reliable communication on high-voltage wires for the needs of relay protection, in other words it is created specifically for the power engineering and its staff.

The organization of HF communication channel is not the focus of this article but we consider it only as a part of high – frequency chokes. High-frequency chokes are the main elements of HF communication channels.

***Key words:** high –frequency choke, solenoid, inductance.*

Появление линий электропередач ещё в начале прошлого века подтолкнуло инженерную мысль к одновременной организации на них каналов связи.

Низкие затраты на сооружение и эксплуатацию каналов высокочастотной связи по высоковольтным линиям и высокая надежность обусловили их широкое распространение в энергосистемах большинства стран мира.

И каких бы успехов не достигала беспроводная связь, ей невозможно будет конкурировать с оперативной и надежной связью по высоковольтным проводам для нужд релейной защиты, т.е. создаваемой специально для нужд энергетики и обслуживаемой её персоналом.

Организация каналов ВЧ связи по ВЛ не является темой данного исследования и здесь рассматривается лишь такой её объект, как высокочастотный заградитель. ВЧ заградители являются неотъемлемым элементом канала ВЧ связи и их назначением является ослабление шунтирующего действия шин подстанций на параметры линейного тракта

канала ВЧ связи. Высокочастотный заградитель включается в расщелку фазного провода ВЛ и шин подстанции.

Высокочастотный заградитель состоит из силового реактора, элемента настройки и устройства защиты от перенапряжения.

Задачей его является создание полосы заграждения – полосы частот, в пределах которой сопротивление заградителя, как двухполюсной цепи, не меньше определенной величины.

В этом случае утечка энергии передаваемого сигнала в сторону шин подстанции будет минимальной.

Индуктивность реактора является основным его параметром, т.к. полоса заграждения при неизменной схеме настройки прямо пропорциональна значению этой индуктивности.

Для расчёта индуктивности реактора высокочастотного заградителя используются различные методы. Задача настоящего исследования – оптимизировать эти методы. В качестве исследуемого объекта выбран серийный высокочастотный заградитель ВЗ-630-0,5 У1.

Катушка реактора выполнена проводом АС300/66 ГОСТ - 80, число витков в конструкции $\omega=29,5$; диаметр – 980 мм, длина обмотки – 1060 мм.

Т.к. реактор, как объект теоретической электротехники, представляет собой соленоид, его индуктивность может быть рассчитана по простейшей формуле:

$$L = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \omega^2 \cdot d \cdot \Phi$$

где: ω – число витков соленоида;

d – диаметр;

Φ – коэффициент, зависящий от соотношения диаметра соленоида d и его длины a . $\alpha = \frac{a}{d}$ или $\frac{1}{\alpha} = \frac{d}{a}$

Этот коэффициент рассчитывается по определенной методике (для данной формулы не сложной) и приводим его в виде таблицы.

Таблица коэффициентов $1/\alpha$ и Φ

$1/\alpha$	Φ
0,75	5,54
76	5,59
77	5,64
78	5,70
79	5,75
0,80	5,80
81	5,86
82	5,91
83	5,96
84	6,01
0,85	6,06
86	6,11
87	6,16
88	6,22
89	6,27
0,90	6,32
91	6,36
92	6,41
93	6,46
94	6,51
0,95	6,56
96	6,61
97	6,65
98	6,70
99	6,75
1,00	6,79

В нашем случае $a > d$, поэтому воспользовавшись соотношением:

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{d}{a} = \frac{980}{1060} = 0,92$$

определяем из таблицы значение $\Phi=6,41$.

Тогда:

$$L = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{4\pi} \cdot 29,5 \cdot 0,98 \cdot 6,41 = 0,547 \text{ [мГн]}.$$

Более точно значение индуктивности соленоида можно найти по формуле:

$$L = \frac{\pi}{4} \cdot \mu_0 \cdot \omega^2 \cdot \frac{d^2}{a} \cdot K_a$$

где: ω , d , a – те же геометрические и физические параметры.

K_a – коэффициент, также зависящий от соотношения диаметра соленоида d и его длины a .

Он также рассчитывается по несложной формуле, не имеющей отношение к данному исследованию и его так же приводим в виде таблицы.

Таблица 2

Таблица коэффициентов $\frac{1}{\alpha}$ и K_α

$1/\alpha$	K_α
0,89	0,713308
0,90	0,710969
91	708646
92	706339
93	704047
0,94	0,701770
0,95	0,669508
96	697262
97	695030
98	692813
0,99	0,690611
1,00	0,688423

Воспользовавшись отношением:

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{d}{a} = \frac{980}{1060} = 0,92$$

определяем из таблицы $K_a = 0,706339$.

Тогда:

$$L = \frac{\pi}{4} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 29,5^2 \cdot \frac{0,98^2}{1,06} \cdot 0,706339 = 0,5497 \text{ [мГн]}.$$

Для формулы значение коэффициента Φ мы определяли простым соотношением $\frac{1}{\alpha} = \frac{d}{a}$.

Точное выражение для величины коэффициента Φ , входящего в формулу имеет вид:

$$\Phi = \frac{4\pi}{3} \cdot \left[\sqrt{\alpha^2 + 1} \cdot \left(K + \frac{1 - \alpha^2}{\alpha^2} \cdot E \right) - \frac{1}{\alpha^2} \right]$$

где K и E – соответственно полные эллиптические интегралы первого и второго рода с модулем

$$k = \frac{1}{\sqrt{\alpha^2 - 1}}$$

Модуль k для нашего соленоида:

$$k = \frac{1}{\sqrt{1,08163^2 + 1}} = 0,678855$$

Из таблиц полных эллиптических интегралов первого и второго рода для $k^2 = 0,46$

Таблица 3

Таблица коэффициентов K и E

K	E
1,74435	1,42269
75075	41808
75727	41345
76390	40879
1,77065	1,40411
1,77752	1,39939
78452	39465
79165	38988
79892	38509
1,80633	1,38026
1,81388	1,37540
82159	37051
82946	36560

83749	36064
84569	35566
1,85407	1,35064

$$K = 1,82759; E = 1,37051$$

Тогда при:

$$\sqrt{\alpha^2 + 1} = 1,473066,$$

$$\frac{1 - \alpha^2}{\alpha^2} = -0,145243,$$

$$\frac{1}{\alpha^2} = 0,854757$$

$$\Phi = \frac{4\pi}{3} [1,473066 \cdot (1,82759 - 0,145243 \cdot 1,37051) - 0,854757] = 6,431222$$

Значение индуктивности соленоида по формуле [6.1] при уточненном Φ будет равно:

$$L = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{4\pi} \cdot 29,5^2 \cdot 0,98 \cdot 6,431222 = 0,54848 \text{ [мГн]}.$$

При большом α , т.е. для длинного соленоида можно воспользоваться формулой:

$$\Phi = \frac{\pi^2}{\alpha} \left[1 - \frac{4}{3\pi} \cdot \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{8} \cdot \frac{1}{\alpha^2} - \frac{1}{64} \cdot \frac{1}{\alpha^4} + \dots + (-1)^{n+1} \frac{(3 \cdot 5 \dots 2n - 3)^2}{2^{2n} \cdot n! (n + 1)!} \cdot \frac{2n - 1}{\alpha^{2n}} \right]$$

или формулой:

$$\Phi = \frac{\pi^2}{2\alpha^2} \left(\frac{1}{\beta} - \frac{8}{3\pi} - \frac{\beta^3}{8} + \frac{\beta^5}{16} - \frac{15}{128} \cdot \beta^7 + \frac{21}{128} \beta^9 - \frac{315}{1024} \cdot \beta^{11} + \frac{297}{512} \beta^{13} - \dots \right)$$

где:

$$\beta = \frac{d/2}{\sqrt{\alpha^2 + \frac{d^2}{4}}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 4\alpha^2}}$$

При малом α , т.е. для короткого соленоида:

$$\Phi = 2\pi \left[\left(1 + \frac{\alpha^2}{8} - \frac{\alpha^4}{64} \right) \cdot \ln \frac{4}{\alpha} + \frac{1}{2} + \frac{\alpha^2}{32} + \frac{\alpha^4}{96} + \dots \right]$$

В нашем исследовании мы имеем дело с коротким соленоидом, поэтому воспользуемся формулой:

$$\Phi = 2\pi \left[\left(1 + \frac{1,08163^2}{8} - \frac{1,08163^4}{64} \right) \cdot \ln \frac{4}{1,07163} - \frac{1}{2} + \frac{1,08163^2}{32} + \frac{1,085163^4}{96} \right] = 6,420977$$

В этом случае индуктивность соленоида, определенная по формуле [1] с коэффициентом Φ , определенном по формуле составит:

$$L = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{4\pi} \cdot 29,5^2 \cdot 0,98 \cdot 6,420977 = 0,54761 \text{ [мГн]}.$$

Использованные источники:

1. Микуцкий Г.В. Устройства обработки и присоединения высокочастотных каналов. М., «Энергия», 1974, 201 с. [95.1976] УДК 621.372.018.782.3.001.24
2. Справочник по проектированию электроэнергетических систем // Под ред. С. Рокотяна и И.М. Шапиро. — М.: Энергия, 1977
3. Ишкин В.Х. Агафонов С.С. Справочник по проектированию систем передачи информации в энергетике. М., «Энергоатомиздат» 1991, 262 с.