

КОНТРОЛЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ КРИТЕРИЕВ ПОДОБИЯ

д.т.н., проф. Б.Т. Кононов, А.А. Нечаус

Показано, что геометрический и электрический критерии подобия, составленные для силовых кабелей, связаны между собой логарифмической зависимостью. Отклонения от данной закономерности рассматриваются как признак конструктивных или технологических ошибок. По этому признаку обнаружены ошибки в действующих нормативных документах.

Постановка проблемы. В настоящее время при разработке стандартов на кабельную продукцию не учитывается то обстоятельство, что соблюдение отдельных требований, регламентируемых соответствующими нормами, еще не гарантирует отсутствие конструктивных или технологических ошибок в выпущенных изделиях. При разработке нормативной документации на кабельные изделия необходимо учитывать общие закономерности, присущие выпускаемой продукции и найти взаимосвязь между отдельными ее параметрами, характеризующую изделие в целом. Физической основой установления такой взаимосвязи параметров является подобие процессов, определяющих условия эксплуатации кабельной продукции и последующего старения изоляции. Для обоснования стандартов на кабельную продукцию воспользуемся теорией подобия.

Силовые кабели одной серии состоят из одних и тех же материалов и конструктивных элементов. Введем необходимые критерии подобия и выполним анализ существующей нормативной документации.

Анализ литературы. Процессы, происходящие в кабельных изделиях, характеризуются множеством взаимосвязанных параметров, таких как: температура, напряженность электрического поля, механические напряжения, особенности конструкции и условий эксплуатации [1]. Выделение существенных факторов и группирование их в безразмерные комплексы позволяет уменьшить число независимых переменных и решить задачу контроля изделий [2].

Цель работы – найти закономерности, присущие однотипным сериям изделий и на этой основе выполнить анализ связности (непротиворечивости) существующей нормативной документации.

В качестве примера рассмотрены трехфазные силовые кабели с одно- и многопроволочными круглыми алюминиевыми и медными жилами класса 1 по ГОСТ 22483-77 с пластмассовой, пропитанной бумажной и бумажной изоляцией на номинальные напряжения 1, 6 и 10 кВ по ГОСТ 16442-80, ГОСТ 18410-73 и ГОСТ 18409-73 соответственно [3 – 6].

Выделение определяющих параметров и составление критериев подобия. Примем в рассмотрение шесть основных параметров, которые регламентируются действующими стандартами: сечение жилы – S_p , мм²; активное сопротивление жилы – R , Ом; толщина изоляции жилы – Δ , мм; толщина поясной изоляции – Δ_1 , мм; длительно допустимый ток – I , А; номинальное напряжение – U , В ($n = 6$). Число основных размерностей (k) равно четырем: m , $k\Gamma$, c , A . Следуя методу анализа размерностей [2] можем составить $n - k$ критериев подобия. В данном случае $n - k = 2$, т.е. получим два критерия:

$$\pi_1 = \frac{S_p}{\Delta \cdot \Delta_1}; \quad \pi_2 = \frac{I \cdot R}{U}. \quad (1)$$

Первый критерий подобия представляет собой отношение расчетного сечения токопроводящей жилы к произведению толщин изоляции жилы и поясной изоляции кабеля, то есть связывает между собой геометрические параметры кабеля.

Второй критерий учитывает связь электрических характеристик кабеля, он равен отношению произведения длительно допустимого тока в кабеле и активного сопротивления токопроводящей жилы к номинальному напряжению кабеля. В качестве R принимались значения активного сопротивления постоянному току медных R_m и алюминиевых R_a одно- и многопроволочных жил класса 1 [3]. В качестве I принимались значения длительно допустимых токовых нагрузок кабелей с пластмассовой, пропитанной бумажной и бумажной изоляцией при прокладке $I_{зв}$ – в земле и $I_{в}$ – на воздухе для трехфазных кабелей с медными ($I_{зМ}$, $I_{вМ}$) и алюминиевыми ($I_{зА}$, $I_{вА}$) жилами [4 – 6].

Исходя из введенных обозначений, критерии подобия (1) обозначены следующим образом:

$$\pi_1 = \frac{S_p}{\Delta \cdot \Delta_1} \text{ – критерий, связывающий геометрические размеры кабелей;}$$

$\pi_{2ЗМ} = \frac{I_{ЗМ} \cdot R_{М}}{U}$, $\pi_{2ВМ} = \frac{I_{ВМ} \cdot R_{М}}{U}$ – критерии подобия кабелей с медными жилами при прокладке их в земле и на воздухе соответственно;

$$\pi_{2за} = \frac{I_{3А} \cdot R_A}{U}; \quad \pi_{2ва} = \frac{I_{ВА} \cdot R_A}{U} \quad \text{– то же для кабелей с алюминиевыми}$$

жилами.

Расчет критериев подобия и их анализ. Пример результатов расчета критериев подобия для кабелей с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение 6 кВ представлен в табл. 1.

Таблица 1

Критерии подобия силовых кабелей на 6 кВ с пластмассовой изоляцией

Sp, мм ²	U = 6 кВ				
	π_1	$\pi_{23М}$	$\pi_{2за}$	$\pi_{2ВМ}$	$\pi_{2ва}$
15,9	2,7509	17,48	22,05	16,15	20,475
25,06	3,8793	14,681	18	13,237	17
34,19	4,7885	12,961	16,06	11,903	15,33
50,12	5,8965	10,646	13,087	10,038	12,583
50,24	5,9106	10,529	12,957	9,928	12,458
69,25	6,7892	9,46	11,68	9,24	11,315
69,66	6,8294		11,493		11,134
94,3	9,2451		10,335		10,07
118,4	11,6059		9,313		9,313
121,15	11,8774	7,4242	9,167	7,55	9,167
146,9	14,4029		8,5		8,5
152,73	14,9735	6,7	8,25	6,7	8,25
181,4	17,7814		7,885		8,023
184,31	18,0696	6,289	7,838	4,717	7,975
234,9	23,0333		7,147		7,36
235,92	23,1294	5,7479	7,147	5,942	7,36

Как видно из табл. 1, критерии подобия для различных типоразмеров кабелей не равны, однако, учитывая, что они являются безразмерными величинами, между ними можно установить взаимосвязь вида

$$\pi_2 = F(\pi_1). \quad (2)$$

По данным табл. 1 были построены в двойном логарифмическом масштабе точечные графики критериев подобия, на рис. 1 показан их вид на примере критериев $\pi_{2вм} = F(\pi_1)$ для кабелей на напряжение 6 кВ с пластмассовой (а) и на напряжение 10 кВ с пропитанной бумажной (б) изоляцией. Из рис. 1 видно, что значения критериев π_2 в зависимости от значения π_1 меняются по сходным зависимостям, то есть между критериями существует определенное взаимосоответствие и, значит можно утверждать, что кабели подобны. Полученные графики критериев подобия можно аппроксимировать графиками степенных функций вида:

$$\pi_2 = A\pi_1^{-B}. \quad (3)$$

Значения коэффициентов А и Б указаны в табл. 2.

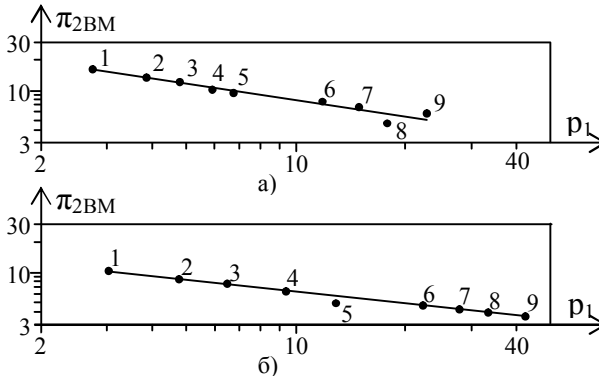


Рис. 1. Графики критериев подобия кабелей на напряжение 6 кВ с пластмассовой (а) и на напряжение 10 кВ с пропитанной бумажной изоляцией (б)

Таблица 2

Коэффициенты уравнений аппроксимирующих прямых

Класс напряжения	Критерии	Кабели силовые с пластмассовой изоляцией		Кабели силовые с пропитанной бумажной изоляцией		Кабели силовые с бумажной изоляцией	
		А	Б	А	Б	А	Б
1 кВ	π_{23M}	528,86	0,7209	702,74	0,4778		
	π_{23a}	669,12	0,7276	905,43	0,4807		
	π_{2BM}	333,12	0,5841	516,33	0,4112		
	π_{2Ba}	447,71	0,6107	637,13	0,4098		
6 кВ	π_{23M}	28,54	0,5308	49,473	0,4404	49,643	0,4799
	π_{23a}	33,9	0,515	61,33	0,434	56,19	0,45
	π_{2BM}	26,28	0,5221	42,321	0,3836	38,223	0,3922
	π_{2Ba}	29,942	0,4668	50,966	0,38	33,37	0,3086
10 кВ	π_{23M}			21,433	0,4544	21,041	0,4917
	π_{23a}			27,422	0,4535	23,707	0,4537
	π_{2BM}			17,777	0,3866	16,761	0,3993
	π_{2Ba}			22,27	0,3806	23,694	0,432

Неравенство коэффициентов А и Б, т.е. отсутствие полного подобия различных типов кабелей, по-видимому, обусловлено тем, что эти коэф-

коэффициенты зависят от параметров кабелей, которые не принимались в рассмотрение в данной работе.

Практически на всех графиках значения критериев подобия с небольшим разбросом лежат на аппроксимирующих прямых (рис. 1).

Оценить степень подобия кабелей можно, вычислив значения коэффициентов относительного подобия

$$\delta = \frac{\pi_2 - \pi_{2\text{аппр}}}{\pi_{2\text{аппр}}}, \quad (4)$$

где π_2 – значение критерия при соответствующем значении критерия π_1 из табл. 1; $\pi_{2\text{аппр}}$ – значение соответствующей аппроксимирующей функции при том же значении критерия π_1 .

Другими словами, коэффициент относительного подобия δ определяет, в какой степени существующий критерий подобия π_2 отличается от критерия $\pi_{2\text{аппр}}$, при котором обеспечивается полное подобие кабелей. Значения δ для критериев подобия кабелей с пластмассовой изоляцией указаны в табл. 3.

Таблица 3

Значения коэффициентов относительного подобия силовых кабелей с пластмассовой изоляцией

U = 1 кВ					U = 6 кВ				
π_1	$\pi_{23М}$	$\pi_{23а}$	$\pi_{2ВМ}$	$\pi_{2Ва}$	π_1	$\pi_{23М}$	$\pi_{23а}$	$\pi_{2ВМ}$	$\pi_{2Ва}$
	δ					δ			
9,3529	0,08	0,107	0,099	0,109	2,7509	0,048	0,095	0,043	0,097
10,991	0,001	0,026	0,011	0,021	3,8793	0,056	0,068	0,022	0,069
13,568	0,036	0,056	0,027	0,054	4,7885	0,043	0,061	0,026	0,064
14,32	0,097	0,08	0,082	0,067	5,8965	0,043	0,037	0,036	0,038
14,354	0,106	0,087	0,091	0,074	5,9106	0,052	0,046	0,044	0,046
19,236	0,109	0,002	0,007	0,005	6,7892	0,084	0,076	0,044	0,076
19,35		0,01		0,017	6,8294		0,088		0,088
20,956		0,078		0,07	9,2451		0,041		0,05
26,307		0,012		0,012	11,606		0,029		0,023
26,922	0,11	0,011	0,004	0,014	11,877	0,032	0,033	0,046	0,028
30,606		0,007		0,006	14,403		0,007		0,012
31,819	0,094	0,005	0,006	0,0003	14,974	0,013	0,019	0,047	0,026
35,563		0,027		0,029	17,781		0,024		0,027
36,139	0,012	0,035	0,02	0,033	18,07	0,024	0,027	0,187	0,029
41,218		0,016		0,024	23,033		0,06		0,064
41,39	0,004	0,02	0,021	0,026	23,129	0,066	0,064	0,166	0,065

Из всех коэффициентов относительного подобия силовых кабелей наибольшие значения (более 0,15) имеют критерии $\pi_{2\text{ВМ}}$ кабелей с пластмассовой изоляцией на напряжение 6 кВ с сечениями токопроводящих жил 184,31 и 235,92 мм² и критерий $\pi_{2\text{ВМ}}$ кабелей с пропитанной бумажной изоляцией на напряжение 10 кВ с сечением токопроводящих жил 69,25 мм². На рис. 1, а видно, что точки 8 и 9, а на рис. 1, б – точка 5, не попадают на аппроксимирующие кривые.

Для выяснения причины, по которой некоторые критерии выпадают из общего подобия, проанализируем исходные данные для их расчета.

Рассмотрим ряд длительно допустимых токовых нагрузок кабелей напряжением 6 кВ с пластмассовой изоляцией с медными жилами, предназначенных для прокладки на воздухе [4]. Действительно, для сечения токопроводящих жил 184,31 мм² указано значение тока $I_{\text{ВМ}} = 285$ А, хотя для меньшего сечения – 152,73 мм², $I_{\text{ВМ}} = 335$ А. Очевидно, в ГОСТ 16442-80 пункт 7.13 таблица 25 сделана опечатка, и действительно для номинального сечения жил 185 мм² должен быть указан ток 385 А. Сделав это предположение, повторим расчеты для данного вида кабелей.

Новые значения рассчитываемых величин для сечения 184,31 мм² будут следующими: $\pi_{2\text{ВМ}} = 6,372$; $A = 24,132$; $B = 0,4662$; $\delta = 0,018$. При этом для сечения 235,92 мм² – $\delta = 0,065$.

Таким образом, при новом значении тока $I_{\text{ВМ}}$ для данного вида кабелей обеспечивается достаточная степень их подобия (рис. 2, а).

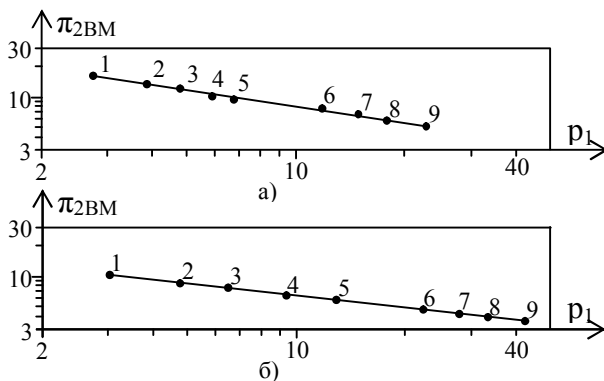


Рис. 2. Графики критериев подобия кабелей на напряжение 6 кВ с пластмассовой (а) и на напряжение 10 кВ с пропитанной бумажной (б) изоляцией с учетом сделанных исправлений

Для кабелей с пропитанной бумажной изоляцией на напряжение 10 кВ следует уточнить значение тока следующим способом:

зная значение $\pi_{2\text{антр}}$ для точки 5 рис. 1, б, найдем значение тока из формулы для π_2 (1), оно будет равно $I_{6\text{м}} = 211 \text{ А}$; в ГОСТ 18410-73 указано значение 178 А.

При новом значении тока график критериев подобия приведен на рис. 2, б.

Вывод. Исходя из изложенного, можно утверждать, что для кабелей с пластмассовой изоляцией на напряжение 6 кВ с круглыми медными жилами сечением $184,31 \text{ мм}^2$ и для кабелей с пропитанной бумажной изоляцией на напряжение 10 кВ с круглыми медными жилами сечением $69,25 \text{ мм}^2$, предназначенным для прокладки на воздухе, необходимо уточнить требования стандартов, поскольку в существующих стандартах эти требования не удовлетворяют условию подобия кабелей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кранихфельд Л.И., Рязанов И.Б. Теория, расчет и конструирование кабелей и проводов. – М.: Высшая школа, 1972. – 384 с.
2. Веников В.А., Веников Г.В. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электротехники). – М.: Высшая школа, 1984. – 439 с.
3. Жилы токопроводящие. Основные параметры. Технические требования. ГОСТ 22483-77.
4. Кабели силовые с пластмассовой изоляцией. Технические условия. ГОСТ 16442-80.
5. Кабели силовые с пропитанной бумажной изоляцией. Технические условия. ГОСТ 18410-73.
6. Кабели силовые с бумажной изоляцией. Технические условия. ГОСТ 18409-73.

Поступила 4.02.2003

КОНОНОВ Борис Тимофеевич, доктор технических наук, профессор, профессор Харьковского военного университета, в 1962 году окончил Львовский политехнический институт. Область научных интересов – электроснабжение, моделирование электромагнитных и электромеханических процессов в системах электроснабжения.

НЕЧАУС Андрей Александрович, адъюнкт Харьковского военного университета. В 1998 году окончил Харьковский военный университет. Область научных интересов – испытание и диагностика электрооборудования, теория подобия.
