

Проф. д-р Хрущов В. М.

Номограмма для расчета токов короткого замыкания

Как известно, расчет сверхтоков при помощи декрементных кривых обладает рядом недостатков, заключающихся в том, что:

1) результаты расчета относятся не к действительным генераторам станций системы, а к некоему среднему по своим характеристикам генератору,

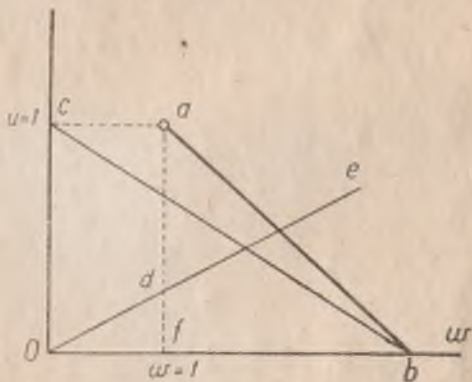
2) принимается, что напряжение всех генераторов сети одно и то же,

3) делается допущение о том, что нагрузка сети приключена непосредственно к клеммам генератора.

Все эти допущения далеки от действительности, и это приводит к тому, что ошибка при расчете токов короткого замыкания методом декрементных кривых получается довольно значительной.

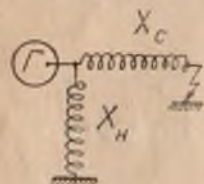
В настоящей статье вниманию читателя предлагается специальная номограмма, при помощи которой можно так же просто, как и по декрементным кривым, определить ток в месте короткого замыкания, но которая позволяет почти целиком устранить указанные выше источники неточности.

Рассмотрим фиг. 1, представляющую спрямленную внешнюю характеристику генератора с переменным $\cos \varphi$ (ab) при питании им сети, в которой произошло короткое замыкание. Эта характеристика представляет, как известно, зависимость напряжения генератора от тока ω , протекающего через генератор. Перестроим эту характеристику в функции тока, в пункте короткого замыкания. С этой целью для любого напряжения мы от значения тока генератора должны будем отнять ток, идущий в нагрузку, согласно схеме фиг. 2. Так как реактивное сопротивление нагрузки X_n принимается величиной постоянной, то ток,



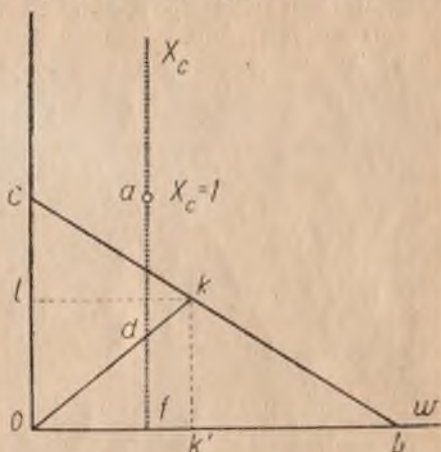
Фиг. 1

идущий в нагрузку, растет прямо пропорционально напряжению на клеммах генератора. При значении реактивного сопротивления сети до пункта короткого замыкания X_c , равного нулю, ток, идущий в нагрузку, также равен нулю; при значении $X_c = \infty$, ток, идущий в нагрузку, равен единице.



Фиг. 2

Поэтому на фиг. 1 этот ток для каждого значения напряжения может быть представлен соответствующим отрезком горизонтальной прямой между прямыми ab и bc , сама же прямая bc и будет являться как раз внешней характеристикой генератора, представляющей зависимость напряжения на его клеммах от тока в месте короткого замыкания для схемы фиг. 2. Как известно, зависимость напряжения между концами некоего реактивного сопротивления от тока, проходящего через него, представляется прямой, проходящей через начало координат, например, прямой Oe (фиг. 1). Тангенс угла наклона этой прямой к оси абсцисс дает величину рассматриваемого реактивного сопротивления. Если опустить из пункта a ($w=1$, $u=1$) перпендикуляр af на ось абсцисс, то отношение отрезка df , который отсекает прямая Oe на перпендикуляре af , к отрезку af даст, очевидно, величину реактивного сопротивления. Таким образом, при помощи прямой cb и прямой af с продолжением ее вверх, мы имеем возможность для любого значения реактивного сопротивления X_c определить ток в пункте короткого замыкания.



Фиг. 3

На фиг. 3 дана номограмма, вытекающая из приведенных выше рассуждений. Откладывая на прямой fa данное значение реактивного сопротивления сети до пункта короткого замыкания X_c в виде отрезка df и проводя прямую Od до встречи ее с прямой bc в точке k , мы получим значение тока короткого замыкания в пункте замыкания в виде отрезка Ok' — проекции Ok на горизонтальную прямую Ow . Удобно отрезок af взять равным 100 мм, тогда отрезок df в мм будет давать прямо реактивное сопротивление X_c в процентах. Когда номограмма выполнена на миллиметровой клетчатке, то построение еще упрощается, так как отпадает необходимость проводить прямую Ok . Простое приложение линейки или угольника по направлению Od дает отрезок kl , равный Ok' и определяющий ток короткого замыкания.

Мы видим, что номограмма фиг. 3 при своей чрезвычайной простоте построения с полным успехом способна заменить декрементные кривые. В таблице 1 сопоставляются результаты определения величины тока короткого замыкания, произведенного при помощи номограммы фиг. 3, с результатами определения его по американским (1932 г.) декрементным кривым для момента времени $t=0,0$ сек. и установившегося тока, а табли-

Таблица 1

		Значение реактивного сопротивления X_c в процентах					
		5	15	25	60	85	
Значение тока короткого замыкания	Для $t = 0,0$ сек.	Из номограммы	5,36	3,5	2,59	1,34	1,01
		Из декрементных кривых	5,3	3,5	2,6	1,35	1,01
	Установившегося	Из номограммы	1,85	1,57	1,36	0,90	0,73
		Из декрементных кривых	1,85	1,61	1,44	1,01	0,83

ца 2 с результатами определения его по декрементным кривым ниж. Чернина („Электричество“, 1934 г., № 10). Номограммы были построены по соответствующим значениям тока короткого замыкания, а именно для американских машин для $t=0$ этот

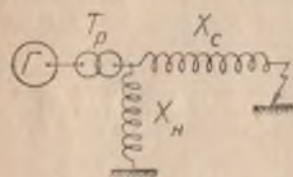
Таблица 2

		Значение реактивного сопротивления X_c в процентах						
		8	18	38	63	88	188	
Значение тока короткого замыкания	Для $t = 0,0$ сек.	Из номограммы	5,5	3,62	2,14	1,42	1,05	0,53
		Из декрементных кривых	5,48	3,61	2,135	1,417	1,059	0,527
	Установившегося	Из номограммы	1,40	1,25	1,03	0,83	0,69	0,43
		Из декрементных кривых	1,39	1,26	1,04	0,85	0,715	0,44

ток был взят равным: $w_k=7,3$, для $t=\infty$ — $w_k=1,97$, для наших машин (по Чернину) для $t=0$ — $w_k=9,42$, для $t=\infty$ — $w_k=1,535$. Для установившихся токов в обоих случаях был введен поправочный коэффициент на наличие выпуклости кривой внешней характеристики в 1,025.

Из сопоставления цифр таблиц 1 и 2 мы видим, что для $t=0$ для американских и для Союзных генераторов совпадение результатов определения тока короткого замыкания по номограмме и кривым прекрасное, для $t=\infty$ результаты определения тока по номограмме дают в отдельных точках некоторое

расхождение, особенно значительное для американских кривых. Следует, однако, отметить, что это расхождение ставит под сомнение не результаты, получаемые из номограммы, а получаемые из декрементных кривых. При внимательном рассмотрении кривых внешних характеристик для американских машин, опубликованных автором в № 5 журнала „Электричество“ за



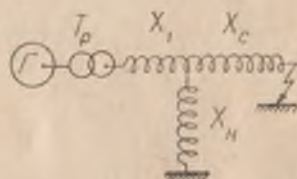
Фиг. 4

1937 г., можно установить, что внешняя характеристика для $t = \infty$ обнаруживает явную тенденцию пройти мимо и притом на значительном расстоянии от точки $u = 1$ и $\omega = 0,6$. Это, разумеется, свидетельствует о преувеличенных значениях токов короткого замыкания для $t = \infty$, которые дают декрементные кривые для средних и больших значений

реактивного сопротивления сети от генератора до пункта короткого замыкания X_c . Аналогичным образом внешняя характеристика для $t = \infty$ для Союзных машин, построенная по данным инж. Чернина, дает большую выпуклость, чем построенная автором графическим путем по характеристике холостого хода.

Та чрезвычайная простота, которой отличается номограмма фиг. 3, позволяет построить без затраты значительного труда и времени ряд номограмм для генераторов различных токов и для напряжений, нормального и повышенного, на 5%. Пользуясь соответствующим образом этим рядом номограмм, можно почти целиком исключить первые два из указанных выше источников неточности расчета токов короткого замыкания.

Не представит большого труда значительно уменьшить также неточность, проистекающую из допущения, что нагрузки генераторов приключены непосредственно на клеммах последних. В современных районных сетях этого никогда не бывает, ибо станции в них строятся для передачи энергии на далекое расстояние и,

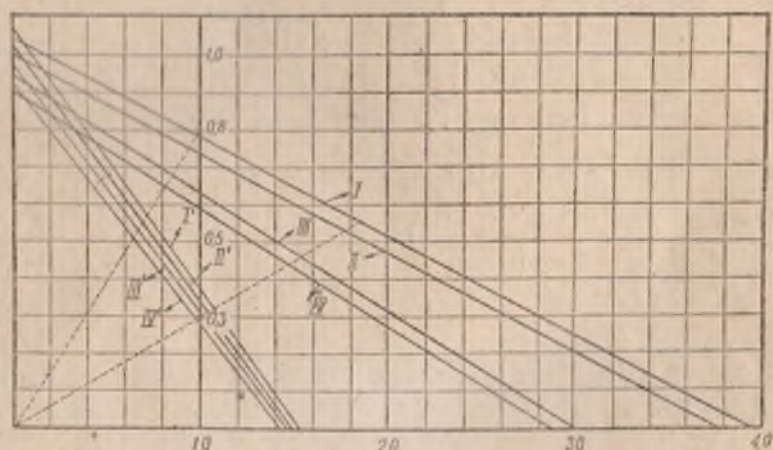


Фиг. 5

следовательно, нагрузка всегда отделена от станции значительным реактивным сопротивлением повысительного трансформатора и проводов сети. Имеет поэтому полный смысл построить рассмотренную выше номограмму: 1) для приключения нагрузки непосредственно к шинам высокого напряжения (фиг. 4) и 2) за некоторым реактивным сопротивлением X_1 от этих шин, имитирующим реактивное сопротивление части сети (фиг. 5). Первой номограммой можно пользоваться при определении величины тока короткого замыкания для станций, расположенных близко к пункту короткого замыкания, второй для станций, далеко отстоящих от этого пункта.

На фиг. 6 изображены эти номограммы для турбогенератора завода „Электросила“ Т-50-2. Прямые I, II, III, IV относятся

к моменту времени $t = 0,25$ сек. после возникновения короткого замыкания, прямые I, II, III, IV служат для определения значений установившегося тока короткого замыкания. Прямые I, II, I', II' построены для схемы фиг. 4, т. е. для случая, когда нагрузка приключена непосредственно к шинам вторичного напряжения повысительной подстанции, прямые III, IV, III', IV' построены для схемы фиг. 5, т. е. для случая, когда точка приключения нагрузки отделена от шин некоторой частью реактивного сопротивления сети X_1 , в данном случае X_1 взята



Фиг. 6

равным 10%. Прямые I, III, I', III' относятся к работе станции с повышенным на 5% напряжением на шинах вторичного напряжения трансформаторной подстанции, прямые II, IV, II', IV' — к работе станции с нормальным напряжением на этих шинах.

Точками, определяющими пересечение прямых с осью абсцисс, являются точки, отвечающие значениям токов короткого замыкания в пунктах приключения нагрузки. Значения этих токов были получены непосредственным делением соответствующих величин расчетных электродвижущих сил, приведенных в статье автора „Рациональный выбор величины расчетной электродвижущей силы и расчетных реактивных сопротивлений генератора при расчете сверхтоков методом симметричных составляющих“¹ на сумму соответствующих величин реактивного сопротивления генератора и реактивного сопротивления трансформатора для прямых I, II, I', II' и на сумму величин реактивного сопротивления генератора, реактивного сопротивления трансформатора плюс реактивного сопротивления части сети до пункта приключения нагрузки для прямых III, IV, III', IV' . Зна-

¹ Журнал „Электричество“, 1935 г., № 17.

чение реактивного сопротивления трансформатора было принято равным 10%. Такой способ определения значений сверхтоков при замыкании в пункте приключения нагрузки заключает в себе известную неточность, которая, однако, как показало контрольное графическое определение тока короткого замыкания, очень невелика.

В таблице 3 приводятся значения сверхтоков при коротких замыканиях в пункте приключения нагрузок для Союзных мощных турбогенераторов.

Таблица 3

Тип турбогенератора	Установившийся сверхток		При $t = 0,25^{\circ} \text{C}$		
	$a_{\text{ш}} = 1,00$	$a_{\text{ш}} = 1,05$	$a_{\text{ш}} = 1,00$	$a_{\text{ш}} = 1,05$	
Нагрузка приключена к шинам	T-50-2	1,488	1,532	3,77	3,94
	T-4376/142	1,488	1,540	3,414	3,54
	T-25-2	1,448	1,495	2,725	3,635
Нагрузка приключена через часть сети	T-50-2	1,417	1,460	2,882	3,013
	T-4376/142	1,417	1,463	2,690	2,790
	T-25-2	1,385	1,427	2,243	2,647

Вторыми точками, определяющими направление прямых в номограмме, являются точки пересечения их с осью ординат; эти точки отвечают значениям напряжения при нормальной работе генератора в пункте приключения нагрузок. Для номограмм, построенных для приключения нагрузки непосредственно к шинам вторичного напряжения трансформаторной подстанции, эти точки, следовательно, будут иметь ординаты, равные 1,05 и 1,00; для номограмм, построенных для приключения нагрузок к пунктам сети, отделенных от шин реактивным сопротивлением X_1 , точки пересечения прямых номограмм с осью ординат будут иметь меньше значения на величину потери напряжения в части сети от шин до пункта приключения нагрузки. Если принять, что омическое сопротивление проводов сети составляет 50% реактивного, то для $\cos \varphi = 0,85$ мы получим потерю напряжения равную, приблизительно, 10%. Поэтому ординаты точек пересечения прямых номограмм (III, IV) будут иметь ординаты 0,95 и 0,90. Для прямых, отвечающих установившемуся току короткого замыкания, все значения ординат точек пересечения прямых с осью ординат, учитывая выпуклость внешних характеристик, будут на 2,5% больше и потому равны для прямой I'—1,076, для прямой II'—1,025, для прямой III'—0,925, для IV'—0,976.

При использовании номограммой не следует упустить, что реактивное сопротивление в номограмме есть реактивное сопротивление сети от пункта приключения нагрузки до пункта короткого замыкания, а не полное реактивное сопротивление, включая и реактивность генератора, как это имеет место при

пользовании декрементными кривыми. После того, как сеть приведена к лучевой схеме, нужно, следовательно, отнять от реактивного сопротивления каждого луча реактивное сопротивление генератора и трансформатора для станций, близких к месту короткого замыкания, а реактивное сопротивление генератора, трансформатора и части сети до пункта приключения нагрузки для станций, удаленных от места короткого замыкания.

Для определения величин сверхтоков при двухполюсном и однополюсном коротких замыканиях необходимо, очевидно, поступать совершенно так же, как и при определении величин этих сверхтоков по декрементным кривым, т. е. найти реактивные сопротивления сети обратной и нулевой последовательностей, сложить их с реактивным сопротивлением прямой последовательности и по этой сумме найти по номограмме ток. При двухполюсном замыкании должна быть взята, разумеется, сумма реактивных сопротивлений прямой и обратной последовательностей, а результат должен быть помножен на $\sqrt{3}$. При однополюсном замыкании берется сумма всех трех последовательностей, а результат помножается на 3. Следует отметить, что значения токов двухполюсного и однополюсного замыкания таким путем получаются с некоторой неточностью. В этих случаях лучше строить специальные номограммы.

Пример. После приведения сети к лучевой схеме реактивное сопротивление луча одной из станций за вычетом реактивного сопротивления генераторов и трансформаторов получилось равным 0,8. Ток в пункте короткого замыкания по номограмме *I* в этом случае будет 0,98; пользуясь номограммой *III* и приняв в соответствии со схемой фиг. 5 — $X_c = 0,7$, получим ток в пункте короткого замыкания равным 0,93. По декрементным кривым инж. Чернина ток в месте короткого замыкания получается равным 0,986. Если данная станция в системе работает с нормальным напряжением или, точнее, напряжение на вторичной стороне повысительной подстанции нормально, то ток в пункте короткого замыкания по номограмме *II* мы получим равным 0,94, а по номограмме *IV* в соответствии со схемой фиг. 5 — 0,89.