

Проф. В. М. Хрущов

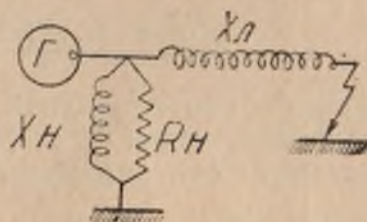
О выборе величин реактивного сопротивления генератора и его электродвижущей силы при расчете установившихся токов короткого замыкания

В последние годы в электротехнической литературе появилось большое количество работ, посвященных вопросам расчета токов короткого замыкания в электрических системах. В этот сложный вопрос за эти годы внесен ряд уточнений, но все же достигнутые до настоящего момента результаты не могут считаться достаточно близкими к идеалу и бесспорно признаваемыми всеми электротехниками. Однако по некоторым вопросам сейчас наметились уже такие решения, которые если и не получили еще вполне единогласного признания, то все же не встречают возражений с серьезной аргументацией.

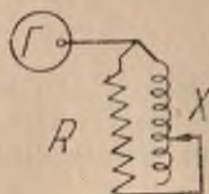
К таким вопросам принадлежит, например, вопрос о необходимости при расчете сверхтоков учета отсасывающего действия нагрузки сети. Сейчас среди электротехников господствует почти всеобщее убеждение в том, что расчет сверхтоков без учета влияния нагрузок можно вести лишь для простейших установок, где возможны случаи отключения нагрузки при коротких замыканиях. В сложных системах расчет сверхтоков без учета влияния нагрузок ведет к совершенно неправильным результатам, давая значительно преувеличенные величины их, и потому должен считаться совершенно недопустимым.

Вторым весьма важным вопросом расчета сверхтоков, в котором также большинство электротехников (правда не такое, как в первом) уже склонилось к определенному решению, является вопрос о том, можно ли синхронное реактивное сопротивление генератора при коротком его замыкании считать величиной, не зависящей от величины сверхтока. Большинство электротехников считает, что такое допущение не влечет за собой скольконибудь значительной ошибки в определении величины сверхтока. Вопрос здесь стоит главным образом лишь в плоскости отыскания методов, позволяющих установить правильную величину этого реактивного сопротивления. Центром тяжести нижеследующих строк и является по существу вопрос об установлении правильных величин синхронного реактивного сопротивления генератора для расчета сверхтоков трехполюсного, двухполюсного и однополюсного замыкания в предположении наличия нагрузки в сети.

Когда какой-либо генератор работает на внешнюю сеть, то картина поведения его вполне отчетливо обрисовывается его внешней характеристикой, построенной с учетом тех условий, в которых работает машина. При коротком замыкании условия работы генератора характеризуются схемой, представленной на



Фиг. 1.



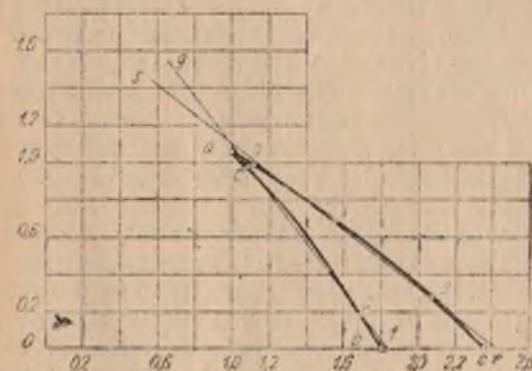
Фиг. 2.

фиг. 1; здесь G — генератор, X_n — иммитирует реактивное сопротивление нагрузки, R_n — ее активное сопротивление, X_l — реактивное сопротивление участка сети от генератора до пункта короткого замыкания.

Объединяя реактивные сопротивления X_n и X_l в одно, мы получим схему фиг. 2, с постоянным активным сопротивлением R и переменным реактивным X , по которой и надлежит строить внешнюю характеристику генератора. Это будет, следовательно, внешняя характеристика генератора с переменным

коэффициентом мощности.

Такая характеристика будет иметь своеобразный вид и неизбежно должна проходить через точки: 1) полного короткого замыкания на клеммах, при котором $X_s = 0$, напряжение на клеммах генератора равно нулю, $\cos \varphi = 0$, а ток имеет максимальное значение; 2) нормальной работы генератора, при которой напряжение генератора — нормальное (или на 5% повышенное), ток нормальный, коэффициент мощности — нормальный, $X_s = \infty$.



Фиг. 3.

вышенное), ток нормальный, коэффициент мощности — нормальный, $X_s = \infty$.

На фиг. 3 построена подобная внешняя характеристика для трехполюсного замыкания (кривая ab). По оси абсцисс здесь отложены относительные значения тока в генераторе $w = \frac{I}{I_n}$ (где I — текущее значение тока, I_n — нормальный ток генератора), по оси ординат — относительные значения напряжения на зажи-

мах генератора $u = \frac{V}{V_n}$ (здесь V — текущее значение напряжения генератора, V_n — нормальное его значение). Мы видим, что внешняя характеристика при переменном $\cos \varphi$ представляет собой слабо выпуклую кривую. Кривая этой внешней характеристики построена для стандартной характеристики холостого хода Союза германских электротехников и средних данных этого Союза для турбогенераторных машин.

На фиг. 3 дана подобная же внешняя характеристика для тех же условий при переменном $\cos \varphi$ для двухполюсного замыкания (кривая ac). При построении этой кривой должно быть учтено размагничивающее действие реакции обмотки статора не только в короткозамкнутых фазах, но и в здоровой. Поэтому построить точки этой характеристики с надлежащей точностью достаточно трудно. Мы видим, что эта кривая является столь же плоской, как и первая. Для однополюсного замыкания внешняя характеристика при переменном $\cos \varphi$ не была построена, так как здесь для точного ее выполнения возникают еще большие трудности. Нет однако никаких оснований думать, что эта внешняя характеристика может быть более выпуклой, чем первые две. Подтверждение этого можно получить путем эксперимента, и действительно — заснятые в соответствующих условиях в машинной лаборатории Харьковского электротехнического института внешние характеристики показали, что самой плоской из трех характеристик является характеристика однополюсного замыкания.

Рассматривая кривые ab и ac (фиг. 3), мы видим, что наибольшая ошибка, которую мы сделаем, если будем определять ток трехполюсного короткого замыкания не по кривой внешней характеристики, а по прямой, проходящей через точки a ($w = 1$, $u = 1,05$) и b ($w = w_k$; $u = 0$), составляет всего 2^o/₁₀₀. Аналогично, максимальная ошибка, которую мы сделаем, если будем определять ток двухполюсного короткого замыкания не по кривой ac , а по прямой ac , будет составлять 2,5^o/₁₀₀. Столь ничтожная разница в результатах определения сверхтоков по криволинейной и прямолинейной характеристикам свидетельствует о том, что к пользованию при расчетах токов короткого замыкания криволинейной характеристикой никаких рациональных оснований не имеется. Наоборот, если мы в основу расчетов положим прямолинейную внешнюю характеристику, т. е. примем реактивное сопротивление генератора постоянным — не зависящим от тока, им отдаваемого, то мы, получая результаты вычислений с вполне необходимой для практики точностью, весьма упростим все наши расчеты и даже сможем сильно повысить точность последних, приняв во внимание ряд факторов, которые очень трудно и даже прямо невозможно бывает учесть при расчете с переменным реактанцем генератора.

Итак, мы приходим к совершенно неоспоримому заключению, что при расчетах сверхтоков реактивное сопротивление генера-

тора должно быть принято постоянным. Приняв во внимание еще второе неоспоримое положение, что расчеты сверхтоков должны вестись с учетом отсасывающего действия нагрузок, мы тем самым твердо фиксируем направление прямой внешней характеристики и определяем следовательно ту фиктивную электродвижущую силу, которую мы должны принять при расчетах.

Исходя из того, что при замыкании через бесконечно большое реактивное сопротивление сети ($X_d = \infty$) в генераторе будет течь только нормальный ток нагрузки, а на его зажимах — нормальное напряжение, мы должны были бы притти к заключению, что наша прямолинейная внешняя характеристика фиксируется при трехполюсном замыкании точками a и b (фиг. 3), а при двухполюсном — точками a и c . Однако, если бы мы для расчета сверхтоков воспользовались фиктивной электродвижущей силой генератора, определяющейся прямой ab , то заведомо получали бы значения сверхтоков меньшие действительных. Очевидно нам нужно криволинейную внешнюю характеристику заменить прямолинейной так, чтобы иметь наименьшие отступления от нее в рабочей ее части.

В современных электрических установках станция работает на сеть через повысительные трансформаторы, и ближайшим пунктом к станции, где возможно короткое замыкание, считаются шины высокого напряжения; короткое замыкание до этого пункта практически редкое явление. Таким образом генератор в установке отделен от места короткого замыкания минимум через реактивное сопротивление трансформатора. Если принять последнее в 10%, то на основе известного графического построения мы получим точку d кривой (фиг. 3), представляющую наименьшую рабочую точку характеристики. Для определения верхней рабочей части нашей характеристики мы примем, что наибольшее реактивное сопротивление пути короткого замыкания в десять раз превосходит реактивное сопротивление нагрузки. Найдя из этих двух сопротивлений равнодействующее реактивное сопротивление и проделав соответствующее графическое построение, мы получим точку e (фиг. 3). Таким образом рабочей частью характеристики для нашей задачи определения сверхтоков является отрезок ее de , который и подлежит спрямлению. Мы заменим отрезок кривой de секущей прямой fg , параллельной прямой ab , причем эта спрямленная внешняя характеристика fg пересекает ось абсцисс в точке f , так что отрезок Of на 1,7% превышает значение полного тока короткого замыкания на зажимах генератора ($w_x^{(3)}$). Совершенно очевидно, что значения токов в построенной таким образом спрямленной внешней характеристике будут отличаться от действительных лишь на десятые доли процента.

Так как в современных сложных сетях одни станции находятся вблизи места короткого замыкания, а другие вдали, то у первых ошибка при определении сверхтока по спрямленной

характеристике будет иметь отрицательный знак, у вторых — положительный, и в сумме эти ошибки друг друга исключают. Поэтому значение тока в месте короткого замыкания, определенное исходя из построенной таким образом спрямленной внешней характеристики, может быть получено с точностью, отвечающей точности измерительных инструментов.

Получив аналогично изложенному выше крайние рабочие точки для кривой внешней характеристики двухполюсного замыкания, мы получим рабочую часть этой характеристики отрезком кривой pq . Заменяя ее прямой rs , мы будем иметь соответствующую спрямленную внешнюю характеристику для двухполюсного замыкания. Как и для трехполюсного замыкания, прямую этой характеристики мы проведем параллельно прямой, соединяющей точки a и c . Чтобы ошибка от замены криволинейной характеристики прямолинейной была наименьшей, прямая rs должна пересекать ось абсцисс в точке r , отстоящей от начала координат на 2% дальше точки c .

Для фиксации направления спрямленной внешней характеристики при однополюсном замыкании мы не имеем определенных данных, и надо признать, что эти данные могут быть получены надежно лишь путем эксперимента. Поэтому вкредь до получения экспериментальных данных мы, по аналогии с предыдущим, проведем прямую внешней характеристики при однополюсном замыкании параллельно прямой, проходящей через точку a — нормальной работы генератора ($u=1,05$, $w=1,0$) и точку b полного однополюсного замыкания (на клеммах) машины ($u=0$, $w=w_k^{(1)}$).

Тангенс угла наклона внешней характеристики дает реактивное сопротивление генератора, а потому последнее, в предположении, что генератор работает с нормальным возбуждением, для всех трех видов короткого замыкания представляется выражением:

$$X_g = \frac{1}{w_k - 1}. \quad (1)$$

Здесь w_k — ток полного короткого замыкания на клеммах: трехполюсного, если мы желаем получить реактивное сопротивление генератора для трехполюсного замыкания; двухполюсного, если нам нужна величина реактивного сопротивления генератора для двухполюсного замыкания, и однополюсного, если предстоит вести вычисления сверхтоков при однополюсном замыкании.

Если генераторы станции работают с повышенным возбуждением (напряжение машины на 5% превышает нормальное), то в числителе выражения (1) вместо единицы будет 1,05, а для w_k должны быть взяты соответствующие этому повышенному возбуждению значения.

Продолжение спрямленных внешних характеристик до оси ординат определяет значение фиктивных электродвижущих сил генератора, которые надлежит принимать при расчетах сверхтоков трехполюсного, двухполюсного и однополюсного замыканий.

Очевидно, что значение фиктивной электродвижущей силы может быть представлено общим для всех случаев короткого замыкания выражением

$$E_{\text{фк}} = \frac{k_1 \cdot w_k}{w_k - 1} \quad (2)$$

Здесь w_k — указанное выше, соответствующее виду короткого замыкания, значение сверхтока при замыкании на клеммах машины, а k_1 — коэффициент, определяющий сдвиг спрямленной внешней характеристики по отношению к прямой, определяющейся точками $w=1$ и $u=1$ и $w=w_k$, $u=0$. При трехполюсном замыкании для генераторов со средними постоянными Союза германских электротехников k_1 равно, как мы видели выше, 1,017, для двухполюсного — 1,02. Прделанное описанным выше способом спрямление внешних характеристик других машин дает несколько большие сдвиги прямых этих характеристик по отношению к прямым, проходящим через точки $u=1$, $w=1$ и $u=0$, $w=w_k$; в среднем коэффициент k_1 может быть принят равным 1,025, не делая различия между видами короткого замыкания.

При работе станции с повышенным напряжением в числителе выражения (2) станет множитель 1,05, а для w_k должны быть подставлены указанные выше, соответственно измененные, значения w_k .

Из способа построения спрямленных внешних характеристик следует, что фиктивная электродвижущая сила и реактивное сопротивление генератора при трехполюсном замыкании будут иметь большие значения, чем при двухполюсном, а те же величины при последнем в свою очередь превышают $E_{\text{фк}}$ и X_z при однополюсном.

Величины токов полного короткого замыкания могут быть получены или известным графическим построением, или на основе выражений (1—3), данных автором в его работе: „Сравнение метода расчета сверхтоков германских электротехников и метода спрямленной внешней характеристики“¹.

Самым надежным источником получения величин токов полного короткого замыкания являются, разумеется, данные завода. Так, например, завод „Электросила“ для своих мощных турбогенераторов дает следующие значения:

Таблица 1

Тип и мощность турбогенератора	T-12-2 15 000 kVA	T-25-2 31 250 kVA	T-50-2 53 960 kVA	T-4376-142 55 500 kVA	
Установившиеся токи полного короткого замыкания	$w_k^{(3)}$	1,5	1,48	1,53	1,53
	$w_k^{(2)}$	2,4	2,37	2,45	2,36
	$w_k^{(1)}$	4,05	3,95	4,1	3,92

¹ Сборник научно-технических статей ХЭТИ. № 1, 1934 г.

Полученные графическим построением, или аналитически, или, наконец, прямо по данным завода значения токов полного короткого замыкания не могут быть однако введены в выражения, определяющие реактивное сопротивление генератора и его фиктивную электродвижущую силу при двухполюсном и однополюсном замыканиях.

Дело в том, что когда генератор подвергается двухполюсному и однополюсному короткому замыканию при работе его в сети, то нагрузка, даже при замыканиях на клеммах, будет все же брать от этого генератора определенный ток, конечно намного меньший, чем при нормальных условиях, но далеко не такой, влиянием которого можно было бы пренебрегать. Этот ток, протекающий в здоровых фазах, создает дополнительную реакцию якоря, в силу чего уменьшаются электродвижущая сила генератора и самый ток короткого замыкания.

Для определения величины поправочного коэффициента, с которым нужно взять значение тока двухполюсного замыкания генератора при отсутствии нагрузки, чтобы получить величину этого тока при наличии нагрузки (присоединенной непосредственно к клеммам генератора), мы воспользуемся выражением, выведенным для последнего случая в статье „Порівняння метода впростаної характеристики розрахунку надструмів з іншими методами“¹:

$$I_s' = \sqrt{3} E \frac{\delta_2 + \delta''}{2 \delta_1 \delta_2 + \delta'' (\delta_1 + \delta_2)}$$

Заменяя в этом выражении кажущиеся сопротивления (3) соответствующими реактивными сопротивлениями, мы получим:

$$I_s' = \sqrt{3} E \frac{X_{z_1} + X_n}{2X_{z_1} X_{z_2} + X_n (X_{z_1} + X_{z_2})}$$

Здесь X_{z_1} — реактивное сопротивление генератора прямой последовательности,

X_{z_2} — обратной последовательности,

X_n — реактивное сопротивление нагрузки.

Принимая реактивное сопротивление нагрузки $X_n = 1$, мы получим:

$$I_s' = \frac{\sqrt{3} E (1 + X_{z_2})}{2X_{z_1} X_{z_2} + X_{z_1} + X_{z_2}} = \frac{\sqrt{3} E}{X_{z_1} + X_{z_2}} \frac{1 + X_{z_2}}{1 + X_{z_2}} = \frac{\sqrt{3} E}{X_{z_1} + k_2 X_{z_2}} \quad (3)$$

Сопоставляя последнее выражение с известным выражением тока двухполюсного короткого замыкания по методу симметричных составляющих при отсутствии нагрузки, мы видим, что наличие нагрузки сказывается как бы некоторым увеличением

¹ „Збірник праць з електротехніки“ електротехнічного відділу Українського інституту промислової енергетики, випуск III, 1932 г., стр. 57.

реактивного сопротивления обратной последовательности генератора, определяющимся поправочным коэффициентом

$$k_2 = \frac{1 + X_{21}}{1 + X_{22}}$$

Разделив выражение (3) на выражение тока двухполюсного короткого замыкания при отсутствии нагрузки, мы будем иметь

$$\frac{I_{с.н}}{I_{с.н}} = \frac{X_{21} + X_{22}}{X_{21} + k_2 X_{22}}$$

Для примера возьмем значения X_{21} и X_{22} , даваемые заводом, "Электросила"¹ для турбогенератора Т-50-2, а именно $X_{21} = 1,685$, $X_{22} = 0,164$. Подставляя эти величины в выражения (3) и (4), получаем:

$$k_2 = \frac{1 + 1,685}{1 + 0,164} = 2,308$$

$$\frac{I_{с.н}}{I_{с.н}} = \frac{1,685 + 0,164}{1,685 + 2,308 \cdot 0,164} = 0,895.$$

Таким образом ток двухполюсного короткого замыкания на клеммах генератора при наличии нагрузки будет на 10,5% меньше того же тока при отсутствии нагрузки.

Поправочный коэффициент, при помощи которого можно от значения тока короткого замыкания при отсутствии нагрузки перейти к значению его при наличии нагрузки, мы в дальнейшем будем обозначать через k_3 , в нашем случае, следовательно, $k_3 = 0,895$.

Последнее значение k_3 получено для случая, когда нагрузка присоединена непосредственно к клеммам генератора; для случая, когда между генератором и нагрузкой имеется сеть, поправочный коэффициент k_3 может быть найден более сложным путем и будет иметь значения более близкие к единице. Следует отметить, что величины k_3 при наличии сети в разных случаях колеблются в нешироких пределах, и потому нет необходимости в точных вычислениях его, а можно для практических расчетов просто задаться значением k_3 .

Для двухполюсного замыкания, с вполне приемлемой для практики точностью, k_3 может быть взят в пределах 0,90—0,95; более высокие значения должны быть принимаемы для машин с малым значением ε , и при наличии далеко отстоящей от станции нагрузки. При однополюсном замыкании генератора с заземленной нейтралью поправочный коэффициент k_3 имеет несколько меньшее значение, а именно 0,88—0,91.

¹ "Турбогенераторы", технический справочник.

Однако, этот случай не имеет большого практического значения, так как в современных установках генераторы работают на сеть через трансформаторы и нейтраль их обычно не заземлена; в этом случае поправочный коэффициент k_s получает приведенные ранее значения для двухполюсного замыкания и даже выше, доходя до 0,96—0,97, в силу того, что ток нагрузки в большой фазе складывается алгебраически с током короткого замыкания и компенсирует в значительной мере размагничивающее действие реакции якоря от токов в здоровых фазах.

Пример 1. Средние данные турбогенератора Союза германских электротехников: $\frac{I_r}{I_n} = 0,7$, $\varepsilon_s = 0,24$, $\cos \varphi = 0,8$, $v_c = 2,57$, стандартная характеристика холостого хода. Из последней $\operatorname{ctg} \alpha = \frac{50}{58} = 0,862$ и потому:

$$w_k^{(3)} = 2,57 \cdot 0,7 = 1,799,$$

величина точно совпадающая с результатами графического построения; далее

$$w_k^{(2)} = \frac{2,57}{\frac{1}{0,7} + 0,24 \cdot 0,862} = 2,72,$$

$$w_k^{(1)} = \frac{2,57 \cdot 3}{\frac{1}{0,7} + 1,2 \cdot 0,24 \cdot 0,862} = 4,59$$

а отсюда $w_k^{(2)} = 2,68$, $w_k^{(1)} = 4,52$, получающихся графическим методом.

Исходя из значений $w_k^{(3)} = 1,799$, $w_k^{(2)} = 2,68$, $w_k^{(1)} = 4,52$, как более точных, и введя для последних двух поправочный коэффициент в 0,92, получаем значения фиктивных электродвижущих сил и реактивных сопротивлений генератора:

$$E_{фв}^{(3)} = \frac{1,017 \cdot 1,799 \cdot 1,05}{0,799} = 2,404;$$

$$E_{фв}^{(2)} = \frac{1,02 \cdot 2,68 \cdot 0,92 \cdot 1,05}{2,68 \cdot 0,92 - 1} = 1,802;$$

$$E_{фв}^{(1)} = \frac{1,02 \cdot 4,52 \cdot 0,92 \cdot 1,05}{4,52 \cdot 0,92 - 1} = 1,410;$$

$$X_z^{(3)} = \frac{1,05}{0,799} = 1,314; \quad X_z^{(2)} = \frac{1,05}{2,68 \cdot 0,92 - 1} = 0,715;$$

$$X_z^{(1)} = \frac{1,05}{4,52 \cdot 0,92 - 1} = 0,380.$$

Тип турбогенератора	При нормальном напряжении				При напряжении повышенном на 5%							
	3-полюсное замыкание		2-полюсное замыкание		1-полюсное замыкание		1-полюсное замыкание					
	$E_{расч}^{(3)}$	$X_2^{(3)}$	$E_{расч}^{(2)}$	$X_2^{(2)}$	$E_{расч}^{(1)}$	$X_2^{(1)}$	$E_{расч}^{(0)}$	$X_2^{(0)}$				
	$E_{расч}^{(3)}$	$X_2^{(3)}$	$E_{расч}^{(2)}$	$X_2^{(2)}$	$E_{расч}^{(1)}$	$X_2^{(1)}$	$E_{расч}^{(0)}$	$X_2^{(0)}$				
Т-4376-142, 55,5 мВА	2,978	1,887	1,852	0,806	1,397	0,362	2,898	1,780	1,884	0,789	1,433	0,350
Т-50-2, 58,9 мВА	2,958	1,887	1,800	0,749	1,375	0,3402	2,922	1,81	1,899	0,710	1,426	0,3420
Т-25-2, 31,25 мВА (6300 V)	3,160	2,082	1,847	0,800	1,323	0,358	3,101	1,975	1,884	0,789	1,442	0,3592

Пример 2. Определим $E_{фк}$ и X для генератора завода „Электросила“ в 58 900 kVA.

$$E_{фк}^{(0)} = \frac{1,025 \cdot 1,53}{0,53} = 2,958;$$

$$E_{фк}^{(2)} = \frac{1,025 \cdot 2,45 \cdot 0,92}{2,45 \cdot 0,92 - 1} = 1,843;$$

$$E_{фк}^{(1)} = \frac{1,025 \cdot 4 \cdot 10,92}{4 \cdot 10,92} = 1,396;$$

$$X_2^{(3)} = \frac{1}{0,53} = 1,887;$$

$$X_2^{(2)} = \frac{1}{2,45 \cdot 0,92 - 1} = 0,796;$$

$$X_2^{(1)} = \frac{1}{4,1 \cdot 0,92 - 1} = 0,360.$$

Практика подсчетов сверхтоков в сложных сетях показывает, что в этом случае коэффициент k_2 при двухполюсном замыкании подлежат принимать в 0,94 — 0,95, а при однополюсном — в 0,95 — 0,96.

Таблица 2 дает величины расчетной электродвижущей силы и реактивного сопротивления мощных турбогенераторов завода „Электросила“, вычисленные со значениями коэффициента $k_2^{(3)} = 0,95$, $k_2^{(1)} = 0,96$ и $k_1 = 1,025$, в предположении нормальной величины напряжения и повышенного на 5%.

Selection of reactance and fictitious electromotive force values in calculating sustained short-circuit currents

By V. M. Khroushchov, prof.

Synopsis

The external characteristics of generator short-circuits answering its operating conditions on a network with a variable power factor, are but

very flattened curves. Besides, only a certain portion of them are operating characteristics. Now, if a straight line is substituted for these operating characteristics, the over-current values, obtained by means of such a straightened characteristic, will be but slightly different from those calculated by means of curves.

Methods are given herewith for calculating generator reactance and fictitious electromotive force.

In case of both line-to-line and line-to-neutral short-circuits a supplementary coefficient of correction is to be added to the value of the short-circuit current on generator terminals with no-load, fixing the straightened external characteristic direction.

Furthermore, the author gives reactance and fictitious electromotive force values for generators produced by the „Electrosila“ works.

12/II 1935.
