

Схема Эванса и Вагнера и расчет сверхтоков методом спрямленной внешней характеристики

Для расчета сверхтоков методом симметричных составляющих в сетях более или менее сложной конфигурации, в частности при учете нагрузок, с успехом пользуются схемой Эванса и Вагнера. Так как в нашей литературе об этой схеме почти нигде не упоминается, мы прежде всего постараемся в нескольких словах проследить развитие ее из элементарных схем простейших случаев короткого замыкания.

Как известно, в выражениях тока короткого замыкания при двухполюсном замыкании в простой открытой сети, состоящей из генератора и проводов, в знаменателе стоит сумма реактивных сопротивлений прямой и обратной последовательности, при однополюсном замыкании—сумма реактивных сопротивлений прямой, обратной и нулевой последовательности; следовательно, реактивные сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательности должны рассматриваться как включенные последовательно.

С физической точки зрения это вполне понятно, ибо ток прямой последовательности однополюсного замыкания всегда будет меньше тока двухполюсного; в свою очередь, ток прямой последовательности двухполюсного всегда меньше тока трехполюсного; так например, при равенстве реактивных сопротивлений прямой, обратной и нулевой последовательности ($X_1 = X_2 = X_0$), из сопоставления выражения тока прямой последовательности при однополюсном замыкании и выражения тока трехполюсного замыкания мы видим, что ток прямой последовательности однополюсного замыкания составляет лишь $\frac{1}{3}$ от тока трехполюсного.

Известно далее также, что токи прямой последовательности создаются электродвижущей силой источника тока, и что последняя в создании токов обратной и нулевой последовательности участия не принимает. Источниками, питающими токи обратной и нулевой последовательности, очевидно, являются напряжения обратной и нулевой последовательности, причем эти напряжения, должны быть рассматриваемы как приложенные к пункту короткого замыкания.

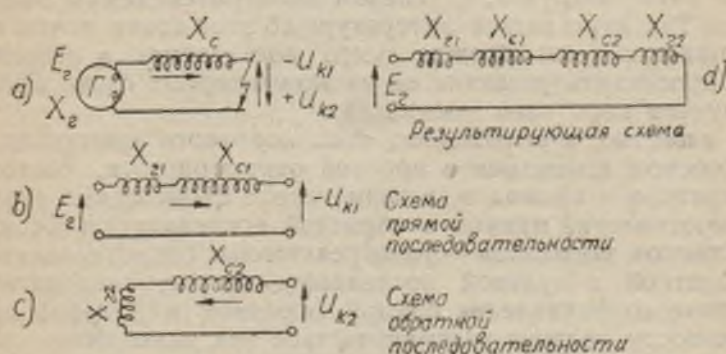
Так как результирующее напряжение в этом пункте равно нулю, то знак напряжений обратной и нулевой последователь-

ностей противоположен знаку напряжения прямой последовательности, и сумма первых двух по абсолютной величине должна быть равна последнему. Если, например, для простейшего случая однополюсного замыкания вывести выражения напряжений прямой, обратной и нулевой последовательности в месте короткого замыкания, то получим:

$$U_{k1} = \frac{E_{\phi}(X_2 + X_0)}{X_1 + X_2 + X_0},$$

$$U_{k2} = -\frac{E_{\phi}X_2}{X_1 + X_2 + X_0},$$

$$U_{k0} = -\frac{E_{\phi}X_0}{X_1 + X_2 + X_0},$$

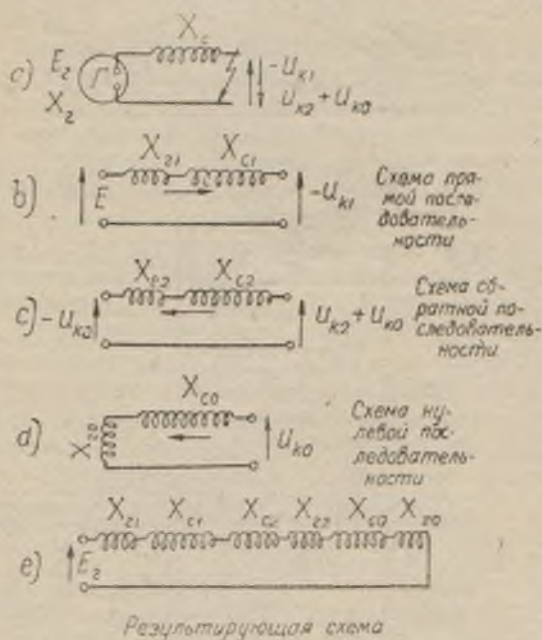


Фиг. 1.

где E_{ϕ} есть фазовое напряжение генератора, X_1 , X_2 , X_0 — реактивные сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательности цепи короткого замыкания. Эти выражения хорошо иллюстрируют сказанное выше.

На фиг. 1 представлены схемы прямой последовательности, обратной последовательности и результирующая схема для двухполюсного замыкания. Прикладывая в пункте короткого замыкания (фиг. 1, а) два равных по величине, но с противоположными направлениями линейных напряжения — одно, принадлежащее системе прямой последовательности U_{k1} , другое — системе обратной последовательности U_{k2} — мы можем нашу цепь разбить на две цепи: 1) цепь прямой последовательности (фиг. 1, б), питаемую электродвижущей силой генератора E_e , и у которой в месте короткого замыкания будет действовать напряжение U_{k1} , направленное против E_e и 2) цепь обратной последовательности (фиг. 1, в), питаемую напряжением U_{k2} , приложенным в пункте короткого замыкания, в которой электродвижущая сила генератора отсутствует. Последовательное включение этих двух цепей дает результирующую расчетную схему (фиг. 1, д).

На фиг. 2 представлены схемы прямой, обратной, нулевой последовательности и результирующая схема для однополюсного замыкания. Прикладывая также в пункте короткого замыкания два равных по величине с противоположными направлениями фазовых напряжения — одно, принадлежащее системе прямой последовательности U_{k1} , другое — системам обратной и нулевой $U_{k2} + U_{k0}$ — и повторяя подобную операцию еще раз, мы можем нашу цепь разбить на три цепи: 1) цепь прямой последовательности (фиг. 2, *b*), с электродвижущей силой E_2 и противонапряжением U_{k1} , 2) цепь обратной последовательности (фиг. 2, *c*),

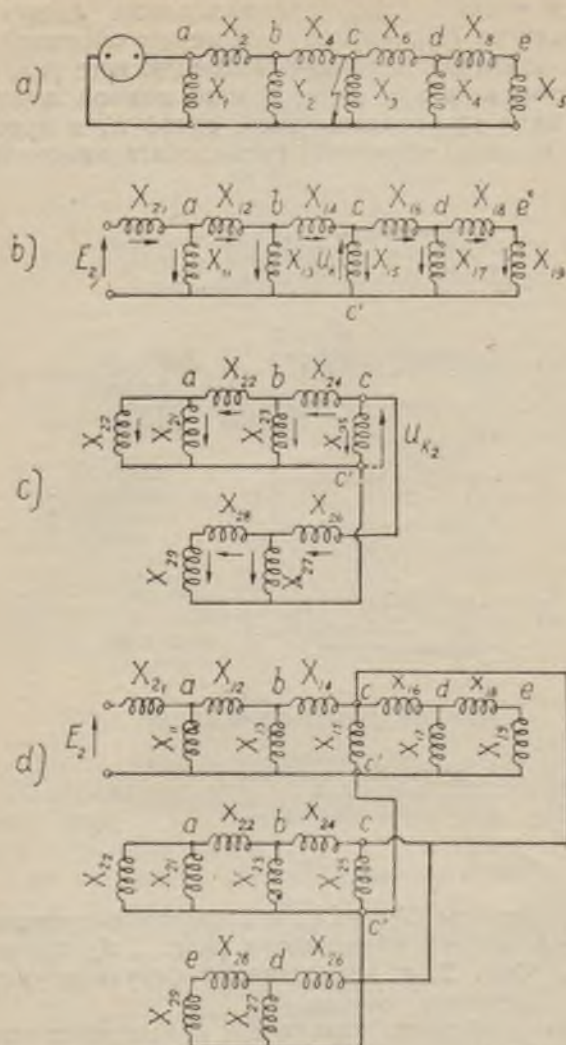


Фиг. 2.

питаемой напряжением $U_{k2} + U_{k0}$ и с противонапряжением U_{k0} и 3) цепь нулевой последовательности (фиг. 2, *d*), питаемую напряжением U_{k0} . Фиг. 2, *e* представляет результирующую, расчетную схему для этого случая.

Совершенно аналогично только что изложенному могут быть составлены расчетные схемы и для цепей с любой конфигурацией. Рассмотрим, например, схему сложной цепи с рядом последовательно и параллельно включенных реактивных сопротивлений (фиг. 3, *a*); пусть короткое замыкание в этой цепи произошло в пункте *c*. Прикладывая мысленно в этом пункте два равных по величине, но с противоположными знаками напряжения U_{k1} и U_{k2} , мы можем получить схемы прямой (фиг. 3, *b*) и обратной последовательности (фиг. 3, *c*). Схема прямой последовательности

очень мало отличается от схемы нормальной работы цепи, схема же обратной последовательности, наоборот, ничего общего со схемой нормальной работы не имеет. Так как напряжение U_2 приложено между пунктами cc' цепи, и так как генератор

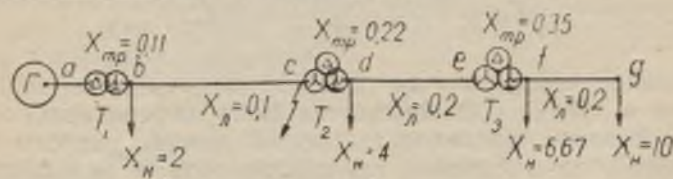


Фиг. 3.

мы должны мыслить себе лишенным электродвижущей силы и обладающим лишь реактивным сопротивлением обратной последовательности, то токи в схеме обратной последовательности должны будут течь в обе стороны от пункта cc' . Следовательно, часть цепи справа от места короткого замыкания

должна рассматриваться в схеме обратной последовательности как включенная в параллель к части цепи слева от места короткого замыкания. Найти результирующее реактивное сопротивление схемы фиг. 3, *c* не представляет, разумеется, никакого труда. Полная расчетная схема с надлежащим включением реактивных сопротивлений прямой и обратной последовательности представлена на фиг. 3, *d*. При определении результирующего реактивного сопротивления этой схемы мы должны будем, очевидно, результирующее реактивное сопротивление обратной последовательности рассматривать как включенное в параллель к части схемы прямой последовательности, расположенной справа от пункта *c*.

При однополюсном замыкании, кроме схемы прямой последовательности и схемы обратной последовательности, появляется еще третья схема нулевой последовательности. Эта схема обычно имеет очень несложную конфигурацию, так как она составляется лишь из участков, по которым протекает составляющая нулевой последовательности; по большей части это участок линии и прилегающий к нему трансформатор. В сложных замкнутых питательных сетях схема нулевой последовательности будет также сложной. Результирующее реактивное сопротивление нулевой последовательности должно быть включено последовательно с результирующим реактивным сопротивлением обратной последовательности. Таким образом при нахождении результирующего реактивного сопротивления полной расчетной схемы при однополюсном замыкании надлежит сумму реактивных сопротивлений обратной и нулевой последовательности рассматривать как включенную в параллель к части схемы прямой последовательности справа от пункта *c*.



Фиг. 4.

Нижеследующий пример иллюстрирует приложение схемы Эванса и Вагнера к расчету токов короткого замыкания в сложных сетях.

Пример. Дана схема фиг. 4, представляющая собой электрическую установку из генератора G , повысительного двухобмоточного трансформатора T_1 , линии передачи (bc), трехобмоточного понизительного трансформатора (T_2), линии передачи (de), второго трехобмоточного понизительного трансформатора (T_3) линии передачи (fg); нагрузки приложены в пунктах b , d , f и g . Реактивные сопротивления трансформаторов, линий передач и нагрузок показаны на схеме в относительных единицах. Поставим себе

задачей найти ток однополюсного короткого замыкания в пункте *c*.

Расчетная электродвижущая сила генератора равна $E_{расч} = 2,252$, реактивное сопротивление последнего прямой последовательности $X_{d1} = 1,251$, реактивное сопротивление обратной последовательности $X_{d2} = 0,2022$.

Вычислим реактивное сопротивление обратной последовательности нашей сети.

Реактивное сопротивление части сети справа от пункта

$$X_{f < g'} = \frac{(10 + 0,2) \cdot 6,67}{10 + 0,2 + 6,67} = 4,03.$$

Реактивное сопротивление части сети справа от пункта *d*

$$X_{dfg} = 4,03 + 0,35 + 0,2 = 4,58.$$

Реактивное сопротивление части сети справа от пункта *c*

$$X_{cdfg} = \frac{4,58 \cdot 4}{4,58 + 4} + 0,22 = 2,358.$$

Реактивное сопротивление части сети слева от пункта *b*

$$X_{b < c'} = \frac{(0,2022 + 0,11) \cdot 2}{2,312} = 0,2703.$$

Реактивное сопротивление части сети слева от пункта *c*

$$X_{cba} = 0,2703 + 0,1 = 0,3703.$$

Реактивное сопротивление обратной последовательности всей сети

$$X_{2c} = \frac{2,358 \cdot 0,3703}{2,728} = 0,32.$$

Реактивное сопротивление нулевой последовательности для замыкания в пункте *c* складывается лишь из реактивного сопротивления нулевой последовательности линии, равного 0,35, и реактивного сопротивления трансформатора и равно, следовательно,

$$X_{0c} = 0,11 + 0,35 = 0,46;$$

таким образом

$$X_{0c} + X_{2c} = 0,78.$$

Вычисляем результирующее реактивное сопротивление включенных в параллель части сети слева от точки *c* и найденной суммы $X_{0c} + X_{2c}$:

$$X_3 = \frac{2,358 \cdot 0,78}{3,138} = 0,586.$$

Реактивное сопротивление полной расчетной схемы слева от пункта *b*

$$X_{nb} = 0,586 + 0,1 = 0,686.$$

Приключая в параллель реактивное сопротивление нагрузки, будем иметь

$$\frac{0,686 \cdot 2}{2,686} = 0,51.$$

Наконец полное расчетное реактивное сопротивление сети

$$X_{расч} = 0,51 + 0,11 + 1,251 = 1,871.$$

По этой величине реактивного сопротивления сети мы можем вычислить составляющую тока прямой последовательности на участке *ab*:

$$I_{ab1} = \frac{2,252}{1,871} = 1,203.$$

Составляющая тока прямой последовательности на участке *bc* определится из соотношения:

$$I_{bc1} = \frac{1,203 \cdot 0,51}{0,686} = 0,896.$$

Полный ток обратной последовательности, равный, очевидно, току нулевой последовательности, мы сможем вычислить, если подсчитаем ток, ответвляющийся от пункта *c* в ветвь с реактивным сопротивлением $X_2 + X_0$; таким образом:

$$I_2 = I_0 = \frac{0,896 \cdot 0,586}{0,78} = 0,673.$$

Наконец ток в месте короткого замыкания при однополюсном замыкании равен всегда утроенной величине составляющей нулевой последовательности:

$$I_k = 3I_0 = 3 \cdot 0,673 = 2,019.$$

Как было отмечено выше, ток нулевой последовательности при замыкании в пункте *c* будет течь только через участок линии *bc* и трансформатор T_1 , ни в последующих частях установки, ни в предшествующих тока нулевой последовательности не будет. Аналогичным образом при замыкании в пункте *e* ток нулевой последовательности будет течь лишь на участке линии *de* и в трансформаторе T_2 .

Ток обратной последовательности будет течь по всем частям установки; вступая в пункт *c*, он разветвляется, согласно схеме фиг. 3, *c* в правую и левую части последней; мы видим, что составляющая тока обратной последовательности в генераторе будет меньше, чем в частях установки у места короткого замыкания; физически это объясняется тем, что нагрузки сети выравнивают диссиметрию тока. Составляющая прямой последовательности, наоборот, уменьшается от генератора к месту короткого замыкания.

Вычислим теперь ток двухполюсного короткого замыкания в том же пункте *c*. Ход расчета и результаты до вычисления реактивного сопротивления обратной последовательности сети X_2 остаются тем же, что и выше. Вычисляя результирующее реактивное сопротивление включенных в параллель части сети слева от точки *c* и X_2 , будем иметь

$$X_3 = \frac{2,358 \cdot 0,32}{2,678} = 0,282.$$

Реактивное сопротивление полной расчетной схемы слева от пункта *b*:

$$X_{nb} = 0,282 + 0,1 = 0,382.$$

Приключая параллельно реактивное сопротивление нагрузки, получаем:

$$\frac{0,382 \cdot 2}{2,382} = 0,3205.$$

Полное расчетное реактивное сопротивление сети

$$X_{расч} = 0,3205 + 0,11 + 1,251 = 1,6815.$$

Ток прямой последовательности в генераторе

$$I_{bc1} = \frac{2,252}{1,681} = 1,339.$$

Составляющая тока прямой последовательности на участке *bc*

$$I_{bc,1} = \frac{1,339 \cdot 0,3205}{0,382} = 1,123.$$

Ток прямой последовательности в пункте короткого замыкания, равный по величине току обратной последовательности,

$$I_{k,1} = I_2 = \frac{1,123 \cdot 0,282}{0,32} = 0,99.$$

Полный ток в месте короткого замыкания получается путем геометрического сложения этих составляющих; так как последние сдвинуты по фазе на угол в 60° , то

$$I_k = \sqrt{3} \cdot 0,99 = 1,717.$$

Вычислим также ток, который будет течь в генераторе в нашей установке; для этого мы должны найти сначала составляющую обратной последовательности тока в генераторе. Ток обратной последовательности на участке *bc*

$$I_{bc,2} = 0,99 \frac{0,32}{0,3703} = 0,864;$$

ток обратной последовательности на участке ab

$$I_{ab2} = 0,864 \frac{0,2703}{0,3322} = 0,703.$$

Складывая геометрически составляющие тока генератора прямой и обратной последовательностей, получаем

$$\bar{I}_2 = (1,339 - 0,703) 0,5 - j(1,339 + 0,703) = 0,318 - j 1,77.$$

Абсолютная величина тока в генераторе равна

$$I_2 = 1,797.$$

Полученные нами значения однополюсного и двухполюсного токов короткого замыкания несомненно представляют собой наиболее правильные величины, которые только можно получить при расчете сверхтоков любым методом. При решении задачи нами были учтены все факторы, которые могут дать более или менее значительную погрешность. Вне нашего внимания из этих факторов осталось по существу только наличие активных сопротивлений в цепи короткого замыкания и в нагрузках, и влияние насыщения генератора—то, чем обычно при расчетах по праву пренебрегают. Таким образом полученные нами решения должны рассматриваться как эталонные.

Представляет интерес сопоставить полученные результаты с теми, которые дает применение метода спрямленной внешней характеристики. Ниже приводится расчет токов однополюсного и двухполюсного короткого замыкания в пункте c сети фиг. 4 последним методом. Значение расчетных электродвижущих сил и реактивных сопротивлений генератора вычислены по формулам:

$$X_c = \frac{1}{\omega_k - 1}; E_{расч} = 1 + x_c,$$

где ω_k —ток соответствующего вида короткого замыкания на клеммах генератора.¹ Значения ω_k должны быть только взяты с некоторым поправочным коэффициентом k_2 , учитывающим влияние дополнительного увеличения реакции якоря от токов, отдаваемых генератором в нагрузку. Значения k_2 даны ниже.

1. Однополюсное замыкание в пункте c (фиг. 4)

Расчетная электродвижущая сила, исходя из тока однополюсного замыкания на клеммах генератора $\omega_k^{(1)} = 4,38$, величины поправочного коэффициента $k_2 = 0,96$ и предположения, что внешняя характеристика проходит через точку $U = 1, \omega = 1$,

¹ См. статью автора „Рациональный выбор величины расчетной электродвижущей силы и расчетных реактивных сопротивлений генератора при расчете сверхтоков методом симметричных составляющих“, Журнал „Электричество“, 1935, № 17.

получается равной $E_{расч} = 1,312$, а реактивное сопротивление генератора $X_g = 0,312$. Реактивное сопротивление линии передачи на участке, где ток однополюсного замыкания проходит через землю, для того чтобы уравнять его с сопротивлением, взятым при расчете методом симметричных слагающих, мы примем 1,83 кратным рабочего. Тогда падение напряжения на участке bc

$$\Delta U_{bc} = 0,183,$$

ток в нагрузку в пункте b

$$I_{bb}' = \frac{0,183}{2} I_k = 0,091 I_k,$$

ток на участке ab

$$I_{ab} = 1,091 I_k.$$

Таким образом

$$1,312 = 1,091 I_k \cdot 0,312 + 1,091 I_k \cdot 0,11 + 0,183$$

и

$$I_k = \frac{1,312}{0,6433} = 2,04,$$

против $I_k = 2,019$, полученного методом симметричных слагающих.

2. Двухполюсное замыкание в пункте c (фиг. 4).

Расчетная электродвижущая сила, исходя из тока двухполюсного замыкания на клеммах генератора $w_k^{(2)} = 2,565$, величины поправочного коэффициента $k_s = 0,95$ и предположения, что внешняя характеристика проходит через точку $U = 1$, $w = 1$, получается равной $E_{расч} = \sqrt{3} \cdot 1,696 = 2,94$, а реактивное сопротивление генератора $X_g = \sqrt{3} \cdot 0,696 = 1,206$. Реактивные сопротивления линий передач, трансформаторов и нагрузок, согласно изложенному в прежних статьях автора,¹ должны быть взяты здесь с множителем 2.

Падение напряжения на участке bc

$$\Delta U_{bc} = 2 \cdot 0,1 I_k = 0,2,$$

ток в нагрузку в пункте b

$$I_{bb}' = \frac{0,2}{2 \cdot 2,0} I_k = 0,05 I_k,$$

ток на участке ab

$$I_{ab} = 1,05 I_k.$$

Таким образом

$$2,94 = 1,05 I_k \cdot 1,206 + 1,05 I_k \cdot 0,22 + 0,2 I_k$$

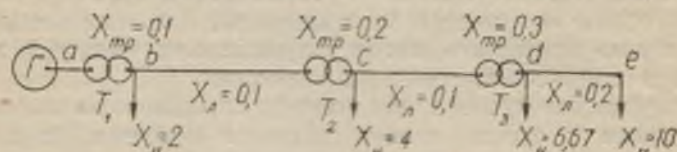
¹ См. журнал „Электричество“, 1932, № 9.

$$I_k = 1,73$$

против $I_k = 1,717$, полученного методом симметричных составляющих.

Мы видим, что результаты расчетов тем и другим методом практически одинаковы, количество же операций при вычислениях методом спрямленной внешней характеристики несравненно меньше, чем при вычислениях методом симметричных составляющих.

Для того чтобы убедиться, что такое хорошее совпадение результатов вычислений тем и другим методами не представляет собой случайности, были произведены подсчеты сверхтоков методом симметричных составляющих и методом спрямленной внешней характеристики при замыкании в ряде пунктов схемы фиг. 4 для однополюсного замыкания и в ряде пунктов схемы фиг. 5 для двухполюсного замыкания. Табл. 1 дает сопоставление результатов подсчетов при двухполюсном замыкании, табл. 2 — при однополюсном.



Фиг. 5.

Таблица 1

Метод	Пункт замыкания				
	a	b	c	d	e
Спрямленной внешней характеристики	2,437	2,09	1,326	0,835	0,886
Симметричных составляющих	2,437	2,074	1,315	0,817	0,676
Разница в %	0	0,77	0,84	2,15	1,48

Таблица 2

Метод	Пункт замыкания					
	b	c	d	e	f	g
Спрямленной внешней характеристики	3,11	2,04	1,802	1,069	1,042	0,706
Симметричных составляющих	3,14	2,019	1,848	1,05	1,018	0,69
Разница в %	-0,3	+1,04	-2,5	+1,82	+2,36	+2,32

Мы видим, что совпадение результатов расчетов сверхтоков тем и другим способом в очень широком диапазоне пунктов короткого замыкания практически может считаться очень хорошим.

Выполненные выше расчеты методом симметричных составляющих произведены так, как это вошло в современную практику. В исходные расчетные величины внесены лишь небольшие изменения, вытекающие из сказанного в статье автора¹ „Рациональный выбор величины расчетной электродвижущей силы и расчетных реактивных сопротивлений генератора при расчете сверхтоков методом симметричных составляющих“; так вместо рекомендуемого значения расчетной электродвижущей силы 2,2 взято значение ее 2,252, соответствующее изменению претерпело, очевидно, и значение реактивного сопротивления генератора обратной последовательности, вместо значения реактивного сопротивления генератора обратной последовательности $X_2 = 0,24$ в расчете было принято 0,2022. Получив столь хорошее совпадение результатов расчета сверхтоков методом спрямленной внешней характеристики с результатами расчета методом, который всеми признается за эталонный, мы этим самым доказываем право применять метод спрямленной внешней характеристики и при несимметричных коротких.

Преимущества применения метода спрямленной внешней характеристики с точки зрения затраты времени не подлежат сомнению.

Следует однако признать, что метод спрямленной внешней характеристики, представляя собой, разумеется, метод приближенный, не может быть применяем для расчета сверхтоков однополюсного замыкания в сетях с трансформаторами с различными типами включения обмоток и заземления нейтралей.

12/VIII 1935.

¹ Журнал „Электричество“, 1935, № 17.