

**РАСЧЕТ ВНЕШНЕЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ
И ФЕРРОМАГНИТНОГО УТРОИТЕЛЯ ЧАСТОТЫ**

Я. В. ПЕТРОВ, А. И. ЗАЙЦЕВ

(Рекомендовано научным семинаром электромеханического факультета)

Большинство известных методов расчета внешней характеристики ферромагнитного утробителя частоты имеет существенные недостатки: необходимость трудоемких расчетов при учете нелинейности кривой намагничивания трансформаторов утробителя, при этом, как правило, требуется построить значительную часть характеристики для отыскания на ней точки, отвечающей заданной нагрузке; большая погрешность расчетов, если в целях упрощения последних выход утробителя представляется активным линейным двухполюсником; отсутствие в ряде случаев универсальности.

Наиболее общий и точный аналитический метод расчета внешней характеристики утробителя предложил Л. Л. Рожанский [1], усовершенствованный им же введением системы относительных единиц [2]. Другой оригинальный аналитический метод для уточненных расчетов разработал С. В. Шапиро [3]. В основу обоих методов положена аппроксимация кривой намагничивания сердечника гиперболическим синусом. Некоторым недостатком обоих методов является неизбежность построения известной части внешней характеристики, чтобы установить связь между данным током нагрузки и соответствующим ему напряжением.

В известной нам литературе расчет токов короткого замыкания за конденсаторами продольной компенсации (ПК) не приводится; между тем, при выборе рабочего напряжения конденсаторов с такими токами необходимо считаться.

Пренебрегаем гармониками выше третьей, потерями в стали и рассеянием вторичной обмотки (последнее учтем лишь при расчете токов к.з. за конденсаторами ПК). Сопротивления рассеяния и активное первичной обмотки учитываем соответствующим уменьшением величины основной гармоники индукции. Кривую намагничивания стали трансформатора аппроксимируем гиперболическим синусом, снимаем на переменном токе частоты 50 гц методом амперметра-вольтметра, причем амплитудные значения индукции и напряженности магнитного поля рассчитываем по действующим значениям э.д.с. и намагнивающего тока.

Между величинами выхода утроителя частоты $3f$ и одной фазы входа частоты f существует однозначная зависимость. Так, при х.х. утроителя уравнение магнитного равновесия для амплитудных значений величин может быть записано

$$\sqrt{H_{1M}^2 + H_{3M}^2} = \alpha \operatorname{sh} \beta \sqrt{B_{1M}^2 + B_{3M}^2}, \quad (1)$$

где: $H_{1M} = \frac{\sqrt{2} I_0 w_1}{l_c}$ — амплитуда эквивалентной синусоиды напряженности магнитного поля частоты f ;

$H_{3M} = \frac{\sqrt{2} I_{3k} \cdot w_2}{l_c}$ — амплитуда третьей гармоники напряженности магнитного поля;

B_{1M}, B_{3M} — амплитуды основной и третьей гармоник магнитной индукции;

α, β — коэффициенты аппроксимирующего выражения;

I_0 — действующее значение намагничивающего тока однофазного трансформатора, входящего в утроитель, при заданной индукции B_{1M} — определяется по кривой намагничивания или замером;

I_{3k} — ток к. з. утроителя (без емкостной компенсации) — принимается чисто индуктивным;

w_1, w_2 — числа витков фазы первичной и вторичной обмоток;

l_c — длина средней линии магнитной индукции.

После простых преобразований:

$$\sqrt{I_0^2 + I_{3k}^2 \left(\frac{w_2}{w_1} \right)^2} = \frac{\alpha l_c}{\sqrt{2} w_1} \operatorname{sh} \beta \sqrt{B_{1M}^2 + B_{3M}^2}. \quad (2)$$

При нагрузке утроителя током I_3 равенство (2) претерпевает следующие изменения:

реактивная слагающая тока нагрузки $I_{3p} = I_3 \cdot \sin \varphi_3$ алгебраически суммируется с током I_{3k} (знак + ставится для емкостного тока), в связи с чем при заданной индукции B_{1M} соответственно меняется индукция B_{3M}

реакция активной слагающей тока нагрузки $I_{3a} = I_3 \cdot \cos \varphi_3$ также может быть выражена уравнением магнитного равновесия типа (2), если считать, что эта слагающая тока частоты $3f$ компенсируется увеличением намагничивающего тока частоты f однофазного трансформатора до

$$I_{0H} = \sqrt{I_0^2 + I_{3a}^2 \left(\frac{w_2}{w_1} \right)^2}, \quad (3)$$

которому отвечает иная индукция B_{1MH} определяемая по кривой намагничивания трансформатора при

$$H_{1MH} = \frac{\sqrt{2} I_{0H} \cdot w_1}{l_c} \quad (4)$$

или приближенно:

$$H_{1MH} \cdot l_c = \sqrt{2} I_{0H} \cdot w_1 = \alpha l_c \cdot \operatorname{sh} \beta B_{1MH},$$

откуда

$$B_{1MH} \approx \frac{1}{\beta} \ln \frac{2\sqrt{2} I_H \cdot w_1}{\alpha \cdot l_c} = \frac{1}{\beta} \ln \times \\ \times \frac{2\sqrt{2} w_1 \sqrt{I_0^2 + I_3^2 (1 - \sin^2 \varphi_3) \left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2}}{\alpha \cdot l_c}. \quad (5)$$

Тогда вместо (2) получим:

$$\sqrt{I_0^2 + (I_{3k} \pm I_3 \cdot \sin \varphi_3)^2 \left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2} = \frac{\alpha \cdot l_c}{\sqrt{2} w_1} \operatorname{sh} \beta \sqrt{B_{1MH}^2 + B_{3MH}^2} = \\ = \frac{\alpha l_c}{\sqrt{2} w_1} \operatorname{sh} \beta \sqrt{\left[\frac{1}{\beta} \ln \frac{2\sqrt{2} w_1 \sqrt{I_0^2 + I_3^2 (1 - \sin^2 \varphi_3) \left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2}}{\alpha \cdot l_c} \right]^2 + B_{3MH}^2} \approx \\ \approx \frac{\alpha \cdot l_c}{2\sqrt{2} w_1} e^{-\beta} \sqrt{\left[\frac{1}{\beta} \ln \frac{2\sqrt{2} w_1 \sqrt{I_0^2 + I_3^2 (1 - \sin^2 \varphi_3) \left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2}}{\alpha \cdot l_c} \right]^2 + B_{3MH}^2}. \quad (6)$$

Решим (6) относительно B_{3MH} .

$$(\beta B_{3MH})^2 = \ln^2 \left[\frac{2\sqrt{2} w_1}{\alpha \cdot l_c} \sqrt{I_0^2 + (I_{3k} \pm I_3 \cdot \sin \varphi_3)^2 \left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2} \right] - \\ - \ln^2 \left[\frac{2\sqrt{2} w_1}{\alpha \cdot l_c} \sqrt{I_0^2 + I_3^2 (1 - \sin^2 \varphi_3) \left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2} \right]. \quad (7)$$

Э.д.с. вторичной цепи при нагрузке и ПК

$$E_3 = 3 \cdot 4,44 \cdot 3f w_2 B_{3MH} \cdot Q_c \cdot 10^{-8} = A w_2 B_{3MH} \cdot Q_c = I_3 Z_3 = \\ = I_3 \frac{x_H - x_c}{\sin \varphi_3} = I_3 \frac{Z_H \cdot \sin \varphi_H - x_c}{\sin \varphi_3}, \quad (8)$$

где $A = 3 \cdot 4,44 \cdot 3f \cdot 10^{-8}$;

$$\sin \varphi_3 = \frac{x_H - x_c}{\sqrt{(r_3 + r_H)^2 + (x_H - x_c)^2}} = \frac{Z_H \cdot \sin \varphi_H - x_c}{\sqrt{(r_3 + Z_H \cdot \cos \varphi_H)^2 + (Z_H \sin \varphi_H - x_c)^2}} \quad (9)$$

(здесь $\cos \varphi_H$, x_H , r_H — соответственно коэффициент мощности и сопротивление нагрузки).

Сравнив (7) и (8) и заменив $\sin \varphi_3$ по (9), окончательно получим при любом характере нагрузки и продольной емкостной компенсации:

$$\ln^2 \left\{ \frac{2\sqrt{2} w_1}{\alpha \cdot l_c} \sqrt{I_0^2 + \left[I_{3k} \pm I_3 \frac{Z_H \cdot \sin \varphi_H - x_c}{\sqrt{(r_3 + Z_H \cdot \cos \varphi_H)^2 + (Z_H \sin \varphi_H - x_c)^2}} \right]^2 \left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2} \right\} - \\ - \ln^2 \left\{ \frac{2\sqrt{2} w_1}{\alpha \cdot l_c} \sqrt{I_0^2 + I_3^2 \left[1 - \frac{(Z_H \cdot \sin \varphi_H - x_c)^2}{(r_3 + Z_H \cdot \cos \varphi_H)^2 + (Z_H \sin \varphi_H - x_c)^2} \right] \left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2} \right\} = \\ = \left(\frac{\beta I_3}{A w_2 Q_c} \right)^2 [(r_3 + Z_H \cdot \cos \varphi_H)^2 + (Z_H \cdot \sin \varphi_H - x_c)^2]. \quad (10)$$

Таким образом, для расчета напряжения на нагрузке необходимо иметь заданными ток и коэффициент мощности нагрузки, величину емкости ПК, конструктивные данные и кривую намагничивания трансформатора утробителя, ток к.з. последнего. Решая трансцендентное уравнение (10) одним из известных приближенных методов, находим значение сопротивления нагрузки Z_H , а затем и напряжение $U_H = I_3 Z_H$.

При чисто активной нагрузке и ПК уравнение (10) несколько упрощается

$$\ln^2 \left[\frac{2\sqrt{2}w_1}{\alpha \cdot I_c} \sqrt{I_0^2 + (I_{3k} \pm I_3 \cdot \sin \varphi_3)^2 \left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2} \right] - \\ - \ln^2 \left[\frac{2\sqrt{2}w_1}{\alpha \cdot I_c} \sqrt{I_0^2 + I_3^2 (1 - \sin^2 \varphi_3) \left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2} \right] = \left(\frac{\beta I_3 x_c}{A w_2 Q_c \cdot \sin \varphi_3} \right)^2, \quad (11)$$

то есть в данном случае определяется сначала $\sin \varphi_3$, затем сопротивление нагрузки

$$r_n = x_c \cdot \operatorname{ctg} \varphi_3 - r_3$$

и, наконец, напряжение на нагрузке U_n .

Уравнение (10) или (11) можно использовать в других вариациях: находить точки внешней характеристики утроителя без компенсации ($x = 0$) и с поперечной компенсацией (емкость включить в нагрузку); рассчитывать величину емкости продольной или поперечной компенсации при заданных

$$I_3, U_n, \cos \varphi_n \text{ и } Z_n = \frac{U_n}{I_3};$$

определять установившиеся токи к. з. за конденсаторами ПК.

Для маломощных установок с утроителем наибольший ток в цепи будет при к. з. непосредственно за конденсаторами ПК, так как активное сопротивление проводки, по крайней мере, на порядок выше индуктивного сопротивления, и по мере удаления точки к. з. от конденсаторов токи уменьшаются. Вследствие этого можно ограничиться расчетом тока к. з. непосредственно за конденсаторами ПК, для чего удобно применить выражение (11), подставляя в него известную величину

$$\sin \varphi_3 = \frac{x_{3s} - x_c}{\sqrt{(r_3)^2 + (x_{3s} - x_c)^2}},$$

где x_{3s} — сопротивление рассеяния вторичной обмотки утроителя (рассчитывается как для обычных дросселей со стальным сердечником).

Так как при к. з. $\sin \varphi_3 \rightarrow 1,0$, допустимо принимать $\sin \varphi_3 = 1,0$, при этом выражение (11) заметно упрощается.

Если трехфазный выход утроителя выполнен по Т-образной схеме, расчет внешней характеристики и токов к.з. не содержит принципиально новых элементов — необходимо лишь все расчеты выполнять для фазы эквивалентной Y.

Хотя основная гармоника индукции непосредственно не входит в конечные выражения (10) и (11), однако от ее величины в значительной степени зависят токи I_0 и I_{3k} , особенно I_0 , так как утроитель работает в области сильных насыщений. Добротность расчетов во многом определяется достоверностью величин I_0 и I_{3k} , поэтому значение основной гармоники индукции желательно устанавливать по возможности точнее, то есть с учетом потери напряжения в сопротивлениях первичной обмотки утроителя. Для опытной модели утроителя на 300 ва (сталь Э31 0,35 мм; $V_{1m} = 15700 - 20300$ гс) хорошие результаты получены при соотношении э.д.с. и напряжения входа $E_1 = (0,96 \div 0,98) U_1$.

Точность расчетов повышается также, если коэффициенты α и β находить не по методу выбранных точек, а по методу наименьших квадратов или средних.

Погрешность расчета внешних характеристик указанной модели утрителя $B_{1м} = 15700 - 20300$ гс, $\frac{I_3}{I_{3к}} = 0 \div 3,3$ при ПК и активной или активно-индуктивной нагрузке не превышала $\pm 6\%$, установившиеся токи трех- и двухфазного к. з. за конденсаторами определялись с ошибками не более $\pm 10\%$.

Выводы

1. Предложены выражения для аналитического или графо-аналитического расчета внешней характеристики ферромагнитного утрителя частоты и установившихся токов к.з. за конденсаторами продольной компенсации.

2. Выражения пригодны в широком диапазоне индукций для различных по характеру и величине нагрузок и тех или иных марок электротехнических сталей, т. е. имеют известную универсальность.

3. Основной недостаток предлагаемого способа — трудоемкость решения трансцендентного уравнения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. Л. Рожанский. Статические умножители частоты в схемах телеуправления и телесигнализации. Диссертация, 1947.
 2. Л. Л. Рожанский. Статические электромагнитные преобразователи частоты. Госэнергоиздат, 1959.
 3. С. В. Шапиро. Аналитический расчет внешней характеристики утрителя частоты с продольной емкостной компенсацией. Труды ГПИ им. А. А. Жданова, т. XVI, вып. 5, 1960.
-