ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА имени С. М. КИРОВА

Том 212 1971

О МЕТОДЕ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ЛИНЕАРИЗАЦИИ ПРИ РАСЧЕТЕ ТОКА УДАРНОГО ГЕНЕРАТОРА С УЧЕТОМ НАСЫЩЕНИЯ

А. В. Лоос, Г. А. Сипайлов

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

На процессы, происходящие при работе ударного генератора, большое влияние оказывает насыщение магнитной цепи. При этом, как показали выполненные исследования, основную роль играет насыщение магнитной цепи по путям рассеяния статора, которое ведет к изменению ударного индуктивного сопротивления $X_{уд}$ в зависимости от величины тока [1].

Одним из наиболее очевидных путей решения нелинейной задачи по определению тока является замена нелинейных элементов линейными. Параметры линейных элементов выбираются таким образом, чтобы решение получающейся линейной системы было близко к решению исходной нелинейной системы. Такой путь решения был принят в [1], где путем исследования полной системы дифференциальных уравнений ударного генератора, записанной в осях d и q, с учетом изменяющейся в функции тока индуктивности рассеяния статорной обмотки получен поправочный коэффициент, введение которого в дифференциальное уравнение контура, которым принято представлять ударный генератор, дает решение, хорошо согласующееся с опытом.

Однако применение полученных результатов несколько ограничено тем, что при этих исследованиях в дифференциальные уравнения генератора была введена зависимость индуктивности рассеяния в функции тока статора для выполненных ударных генераторов. В случае же определения тока для генераторов, у которых зависимость индуктивности рассеяния в функции тока статора отлична от введенной, полученные данные неприменимы. В связи с этим возникает задача получения общего аналитического метода, пригодного для генераторов различных габаритов.

Для решения поставленной задачи целесообразно применить метод эквивалентной линеаризации Н. М. Крылова и Н. Н. Боголюбова [2]. Смысл данной линеаризации характеризуется следующими положениями. Если неизвестный ток проходит через нелинейный элемент, то необходимо заменить этот элемент линейным. Величина эквивалентного линейного элемента выбирается таким образом, чтобы как можно точнее воспроизвести нелинейный элемент. Наиболее целесообразно выбрать данный нелинейный элемент изменяющимся по определенному закону в функции тока. В этом состоит основное достоинство и отличие рассматриваемого метода эквивалентной линеаризации от других способов линеаризации, что позволяет применять его для описания явно нелинейных явлений.

Рассмотрим применение данного метода в связи с задачей расчета тока при работе ударного генератора на индуктивную нагрузку. Вначале пренебрегаем затуханием тока. Такое допущение при определении эквивалентной индуктивности допустимо, так как гармонические составляющие падения напряжения на индуктивности определяются в основном периодической составляющей тока. Упрощенно выражение для тока в данном случае можно представить в виде

$$i = I_m (1 - \cos\omega t). \qquad (1)$$

Если данный ток проходит через нелинейный элемент, то напряжение на зажимах нелинейного элемента, в нашем случае индуктивности, будет выражаться рядом Фурье с основной частотой $\frac{\omega}{2\pi}$:

$$U_L = \sum_{n=0}^{\infty} (U_{cn} \cos n\omega t + U_{sn} \sin n\omega t). \qquad (2)$$

Напряжение на индуктивности является в общем случае функцией не только тока, но и производных тока. Обозначим напряжение на индуктивности следующим образом:

$$U_L = f(\omega t). \qquad (3)$$

В этом случае коэффициенты ряда (2) определяются при помощи выражений:

$$U_{cn} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos n\omega t \, d(\omega t), \qquad (4)$$

$$U_{sn} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin n\omega t \, d(\omega t), \qquad (5)$$

где

$$2\pi = T\omega.$$

Определение эквивалентной линейной индуктивности производится по принципу гармонического баланса, заключающегося в том, что основные гармоники напряжения на эквивалентной линейной и нелинейной индуктивностях должны быть равны.

Падение напряжения на нелинейной индуктивности равно производной от потокосцепления по времени.

$$U_L = \frac{d}{dt}[\psi(i)] = \frac{d}{dt}\left\{\psi[I_m(1 - \cos\omega t)]\right\}. \qquad (6)$$

Потокосцепление в свою очередь является некоторой функцией тока. Опытную зависимость потокосцепления ψ в функции от тока i, которая является нечетной функцией, наиболее просто аппроксимировать выражением вида

$$\psi = a_1 i - a_2 i^3. \qquad (7)$$

Для определения a_1 и a_2 наиболее целесообразно применить метод наименьших квадратов.

Тогда основная синусоидальная гармоника напряжения запишется в виде

$$U_{s1} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \left\{\frac{d}{dt}\left[\psi\left(I_m(1 - \cos\omega t)\right)\right] \sin\omega t\right\} d(\omega t). \qquad (8)$$

Основная косинусоидальная гармоника напряжения

$$U_{c1}=\frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi}\left\{\frac{d}{dt}\left[\psi\left(I_m(1-\cos\omega t)\right)\right]\cos\omega t\right\}d(\omega t). \tag{9}$$

Производя подстановку в (8) и (9) выражение для потокосцепления

$$\psi=a_1I^m(1-\cos\omega t)-a_2I_m^3(1-\cos\omega t)^3, \tag{10}$$

получаем

$$U_{s1}=\omega a_1I_m-3{,}75\omega a_2I_m^3, \tag{11}$$

$$U_{c1}=0. \tag{12}$$

В свою очередь для эквивалентной линейной индуктивности напряжение определяется выражением

$$U_L=L_{экв}\frac{di}{dt}=\omega L_{экв}\cdot I_m\sin\omega t. \tag{13}$$

Тогда согласно принципу гармонического баланса, используя выражения (2) и (13), получаем

$$\omega L_{экв}I_m\sin\omega t=\omega I_m(a_1-3{,}75a_2I^2_m)\sin\omega t, \tag{14}$$

откуда

$$L_{экв}=a_1-3{,}75a_2I_m^2. \tag{15}$$

Решение дифференциального уравнения для тока генератора без учета насыщения при включении на индуктивную нагрузку имеет вид [3]

$$i_г=I_m\left[\sin(\omega t-\varphi_{нг})+e^{-\frac{t(r_г+r_н)}{L_г+L_н}}\cdot\sin\varphi_{нг}\right], \tag{16}$$

где

$$I_m=\frac{E_m}{\sqrt{(r_г+r_н)^2+(\omega L_г+\omega L_н)^2}}.$$

Подставляя в выражение (13) вместо $L_г$ полученное выражение для $L_{экв}$, получаем следующее соотношение для амплитуды тока:

$$I_m=\frac{E_m}{\sqrt{(r_г+r_н)^2+[\omega(a_1-3{,}75a_2I_m^2)+\omega L_н]^2}}. \tag{17}$$

Решением выражения (17) относительно L_m находим амплитуду тока с учетом насыщения магнитной цепи. Подстановкой полученного значения I_m в выражение (16) получаем уравнение для тока с учетом насыщения магнитной цепи. Расчеты, произведенные по данной методике для выполненных ударных генераторов, показали хорошее соответствие с результатами, полученными в [1]. Это говорит о том, что данный метод учета насыщения может быть распространен на генераторы любых габаритов. На рис. 1 приведены кривые тока, рассчитанные с учетом насыщения магнитной цепи с применением метода эквивалентной линеаризации и с применением методики, основанной на введении в дифференциальное уравнение поправочного коэффициента. Как видно из кривых, оба метода дают практически одинаковый результат.

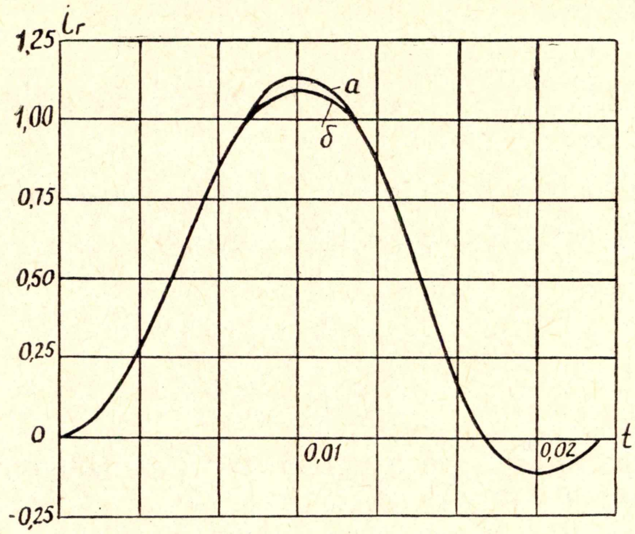

Рис. 1. Кривые тока короткого замыкания статора: *а* — по рассматриваемой методике, *б* — с учетом поправочного коэффициента, учитывающего насыщение

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. А. Сипайлов, А. В. Лоос. Учет насыщения магнитной цепи и изменения скорости вращения при определении тока ударного генератора, «Электричество», 1969, № 1.
2. Н. М. Крылов, Н. Н. Боголюбов. Введение в нелинейную механику, Киев, 1937.
3. Г. А. Сипайлов, А. В. Лоос. Генератор больших импульсных мощностей со ступенчатой или трапецеидальной формой тока. «Электричество», 1967, № 5.