

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ
В ЭЛЕКТРОМАШИННОМ ИМПУЛЬСНОМ ИСТОЧНИКЕ ЭНЕРГИИ**

Г. А. СИПАЙЛОВ, А. В. ЛООС, А. А. ЩЕГОЛЕВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин
и общей электротехники)

Увеличение энергии, передаваемой в нагрузку за время одного импульса тока, возможно за счет использования эффекта повышения напряжения, возникающего при двухфазном коротком замыкании синхронной машины с несимметричным ротором на остающейся разомкнутой третьей фазе статора [1].

Электромашиный импульсный источник энергии [2], использующий этот эффект, содержит ударный синхронный генератор с несимметричным ротором и двухфазным статором, показан на рис. 1. Статорные обмотки А и В смещены одна относительно другой на 90 электрических градусов. Рабочая обмотка В может выполняться более мощной, чем вспомогательная обмотка А.

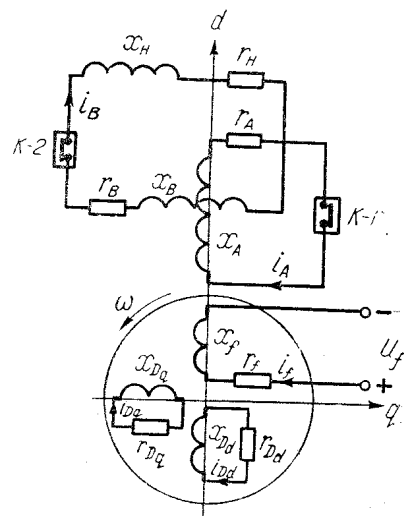


Рис. 1. Принципиальная схема электромашиного источника импульсов

Подробное исследование электромеханических процессов рассматриваемого электромашиного источника энергии требует решения нелинейной системы дифференциальных уравнений с большим количеством периодических коэффициентов. Наличие периодических коэффициентов обусловлено одновременной несимметрией статора и ротора, а нелинейность системы вызвана необходимостью учета насыщения магнитной цепи и изменения скорости вращения ротора.

В анализ переходных процессов дополнительные трудности вносит изменение структуры синхронной машины, так как сначала с помощью

коммутирующего аппарата К-1 замыкается обмотка А. Это происходит в момент времени, когда э. д. с. вспомогательной обмотки e_A проходит через нуль. Затем в момент времени, соответствующий началу положительной полуволны э. д. с. в обмотке В, коммутатором К-2 осуществляется включение нагрузки.

Наличие периодических коэффициентов и нелинейности в системе с учетом ее структурного изменения делает практически невозможным ее аналитическое исследование и выдвигает на первый план для этой цели вычислительные машины [3].

Попытки моделирования системы уравнений, описывающих электромеханические переходные процессы электромашинного импульсного источника энергии в осях α , β , o и d , q , o , не дают возможности освободиться от переменных коэффициентов и приводят к необходимости выполнять операцию дифференцирования.

Возможность получения устойчивой модели на аналоговой вычислительной машине АВМ, составленной по полной системе дифференциальных уравнений с периодическими коэффициентами для однофазного синхронного генератора, показана в [4]. Этот подход применим при составлении математической модели для электромашинного источника энергии.

Уравнения равновесия напряжений, записанные в физических осях в форме, удобной для моделирования на АВМ, имеют вид:

$$\frac{d\Psi_A}{dt} = -r_A i_A, \quad (1)$$

$$\frac{d\Psi_B}{dt} = -(r_H + r_B) i_B, \quad (2)$$

$$\frac{d\Psi_f}{dt} = U_f - r_f i_f, \quad (3)$$

$$\frac{d\Psi_{Dd}}{dt} = -r_{Dd} i_{Dd}, \quad (4)$$

$$\frac{d\Psi_{Dq}}{dt} = -r_{Dq} i_{Dq}. \quad (5)$$

Потокоцепления статорных и роторных контуров:

$$\Psi_A = x_A i_A + x_a i_f \cos \gamma + x_a i_{Dd} \cos \gamma + x_a i_{Dq} \sin \gamma, \quad (6)$$

$$\Psi_B = (x_H + x_B) i_B + x_a i_f \sin \gamma + x_a i_{Dd} \sin \gamma - x_a i_{Dq} \cos \gamma, \quad (7)$$

$$\Psi_f = x_a i_A \cos \gamma + x_a i_B \sin \gamma + x_f i_f + x_a i_{Dd}, \quad (8)$$

$$\Psi_{Dd} = x_a i_A \cos \gamma + x_a i_B \sin \gamma + x_a i_f + x_{Dd} i_{Dd}, \quad (9)$$

$$\Psi_{Dq} = x_a i_A \sin \gamma - x_a i_B \cos \gamma + x_{Dq} i_{Dq}, \quad (10)$$

где i_A , i_B , i_f , i_{Dd} , i_{Dq} — токи соответственно статорных обмоток А и В, обмотки возбуждения и демпферных контуров по продольной и поперечной осям;

r_A , r_B , r_H , r_f , r_{Dd} , r_{Dq} — активные сопротивления статорных обмоток А и В, нагрузки, обмотки возбуждения демпферных контуров по продольной и поперечной осям и соответственно x_A , x_B , x_H , x_f , x_{Dd} , x_{Dq} — индуктивные сопротивления:

U_f — напряжение обмотки возбуждения;

$\gamma = \int_0^t \omega t$ — угол между осью обмотки статора и продольной осью ротора.

Из совместного решения уравнений (8) и (9) определим токи i_f и i_{Dd} :

$$i_f = \frac{x_{Dd}}{x_f x_{Dd} - x_a^2} \Psi_f - \frac{x_a}{x_f x_{Dd} - x_a^2} \Psi_{Dd} - \frac{x_a(x_{Dd} - x_a)}{x_f x_{Dd} - x_a^2} i_A \cos \gamma - \frac{x_a(x_{Dd} - x_a)}{x_f x_{Dd} - x_a^2} i_B \sin \gamma, \quad (11)$$

$$i_{Dd} = \frac{x_f}{x_f x_{Dd} - x_a^2} \Psi_{Dd} - \frac{x_a}{x_f x_{Dd} - x_a^2} \Psi_f - \frac{x_a(x_f - x_a)}{x_f x_{Dd} - x_a^2} i_A \cos \gamma - \frac{x_a(x_f - x_a)}{x_f x_{Dd} - x_a^2} i_B \sin \gamma. \quad (12)$$

Из уравнения (10) определим ток i_{Dq}

$$i_{Dq} = \frac{1}{x_{Dq}} \Psi_{Dq} - \frac{x_a}{x_{Dq}} i_A \sin \gamma + \frac{x_a}{x_{Dq}} i_B \cos \gamma. \quad (13)$$

Подставляя значения токов i_f , i_{Dd} , i_{Dq} в уравнения потокоосцеплений статора (6), (7), после простых преобразований получаем выражения для токов i_A и i_B :

$$i_A = \frac{2}{x''_{qA} + x''_{dA}} \Psi_A - \frac{2x_a(x_{Dd} - x_a)}{(x''_{qA} + x''_{dA})(x_f x_{Dd} - x_a^2)} \Psi_f \cos \gamma - \frac{2x_a(x_f - x_a)}{(x''_{qA} + x''_{dA})(x_f x_{Dd} - x_a^2)} \Psi_{Dd} \cos \gamma - \frac{2x_a}{(x''_{qA} + x''_{dA})x_{Dq}} \Psi_{Dq} \sin \gamma + \frac{x''_{qA} - x''_{dA}}{x''_{qA} + x''_{dA}} i_A \cos 2\gamma + \frac{x''_{qA} - x''_{dA}}{x''_{qA} + x''_{dA}} i_B \sin 2\gamma, \quad (14)$$

$$i_B = \frac{2}{2x_H + x''_{qB} + x''_{dB}} \Psi_B - \frac{2x_a(x_{Dd} - x_a)}{(2x_H + x''_{qB} + x''_{dB})(x_f x_{Dd} - x_a^2)} \Psi_f \sin \gamma - \frac{2x_a(x_f - x_a)}{(2x_H + x''_{qB} + x''_{dB})(x_f x_{Dd} - x_a^2)} \Psi_{Dd} \sin \gamma + \frac{2x_a}{(2x_H + x''_{qB} + x''_{dB})x_{Dq}} \Psi_{Dq} \cos \gamma - \frac{x''_{qB} - x''_{dB}}{2x_H + x''_{qB} + x''_{dB}} i_B \cos 2\gamma + \frac{x''_{qB} - x''_{dB}}{2x_H + x''_{qB} + x''_{dB}} i_A \sin 2\gamma, \quad (15)$$

где x''_{dA} , x''_{qA} , x''_{dB} , x''_{qB} — сверхпереходные индуктивные сопротивления по осям d и q статорных обмоток A и B .

На основании общих законов электродинамики уравнение движения ротора имеет вид:

$$M_m = H_j \frac{d\omega}{dt} + M_\psi, \quad (16)$$

где M_m — момент механических сил,

H_j — инерционная постоянная ротора,

M_ψ — момент электромагнитных сил.

Электромагнитный момент находится как частная производная от электромагнитной энергии по углу поворота ротора γ .

$$M_\psi = \frac{\partial W}{\partial \gamma} = x_a [(i_{Dq} \cos \gamma - i_f \sin \gamma - i_{Dd} \sin \gamma) i_A + (i_{Dq} \sin \gamma + i_f \cos \gamma + i_{Dd} \cos \gamma) i_B]. \quad (17)$$

С учетом последнего выражения разрешим уравнение (16) относительно производной

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{H_j} M_m + \frac{x_a}{H_j} [(i_f \sin \gamma + i_{Dd} \sin \gamma - i_{Dq} \cos \gamma) i_A - (i_f \cos \gamma + i_{Dd} \cos \gamma + i_{Dq} \sin \gamma) i_B] . \quad (18)$$

Структурная схема аналоговой модели, составленная по уравнениям 1÷5, 11÷15 и 18, приведена на рис. 2.

С помощью узлов I÷V модели определяются токи и потокосцепления в статорных и роторных контурах синхронной машины, узел VI реализует уравнение (18). Модель позволяет учитывать насыщение синхронного генератора по основному пути магнитного потока, что достигается изменением в уравнениях коэффициентов в функции суммарного потока в воздушном зазоре.

С целью упрощения электронной модели нормализованная кривая намагничивания (рис. 3, кривая 1) аппроксимируется несколькими линейными участками (рис. 3, кривая 2). Для этих участков графически находится индуктивное сопротивление взаимной индукции x_a в функции квадрата суммарного потокосцепления в воздушном зазоре (рис. 3, кривая 3).

Программу перехода с одного участка на другой задает узел VII, который определяет величину Ψ^2 по формуле

$$\Psi^2 = (\Psi_{Dd} - x_{\sigma Dd} i_{Dd})^2 + (\Psi_{Dq} - x_{\sigma Dq} i_{Dq})^2 , \quad (19)$$

где $x_{\sigma Dd}$, $x_{\sigma Dq}$ — индуктивное сопротивление рассеяния демпферных контуров по осям d и q .

При достижении Ψ^2 значения, найденного для точки излома аппроксимирующей кривой $x_a = f(\Psi^2)$, срабатывают операционные реле ОПР-1, ОПР-2, ОПР-4, которые своими контактами меняют структуру модели. Так как операция дифференцирования на АВМ критична к помехам, то с целью ее исключения включение обмотки В происходит с помощью реле ОПР-3 в момент, когда потокосцепление Ψ_B достигает максимального значения. На аналоговой машине (узел VIII) потокосцепление Ψ_B удобнее получить из уравнения (15), учитывая, что ток i_B в разомкнутой рабочей обмотке равен нулю.

$$\Psi_B = \frac{x_a (x_{Dd} - x_a)}{x_f x_{Dd} - x_a^2} \Psi_f \sin \gamma + \frac{x_a (x_f - x_a)}{x_f x_{Dd} - x_a^2} \Psi_{Dd} \sin \gamma - \frac{x_a}{x_{Dq}} \Psi_{Dq} \cos \gamma - \frac{x''_{qB} - x''_{dB}}{2} i_A \sin 2\gamma . \quad (20)$$

Гармонические функции синуса и косинуса двойного угла образует узел IX модели. На рис. 4 приведена одна из осциллограмм решения, полученная для токов i_A , i_B электромашинного источника энергии с параметрами:

$$x''_{dA} = x''_{dB} = 0,0885, \quad x''_{qA} = x''_{qB} = 0,6, \quad x_A = x_B = x_{Dd} = 1,05, \\ x_f = 1,2, \quad r_A = r_B = r_{Dd} = r_f = 0,005, \quad r_{Dq} = 0,5.$$

Из кривых фазных токов (рис. 4) следует, что при наличии вспомогательной обмотки А и несимметрии ротора ток в рабочей обмотке i_{B1} увеличился в 2,5 раза по сравнению с током i_{B2} , который записан для случая, когда обмотка А отсутствует и ротор симметричен. Сравнение результатов решения, полученных по математической модели на АВМ с экспериментальными исследованиями [5], подтвердило правильность выбранной методики моделирования.

Структурная схема разработанной математической модели содержит не более 50 решающих блоков, что позволяет проводить большую

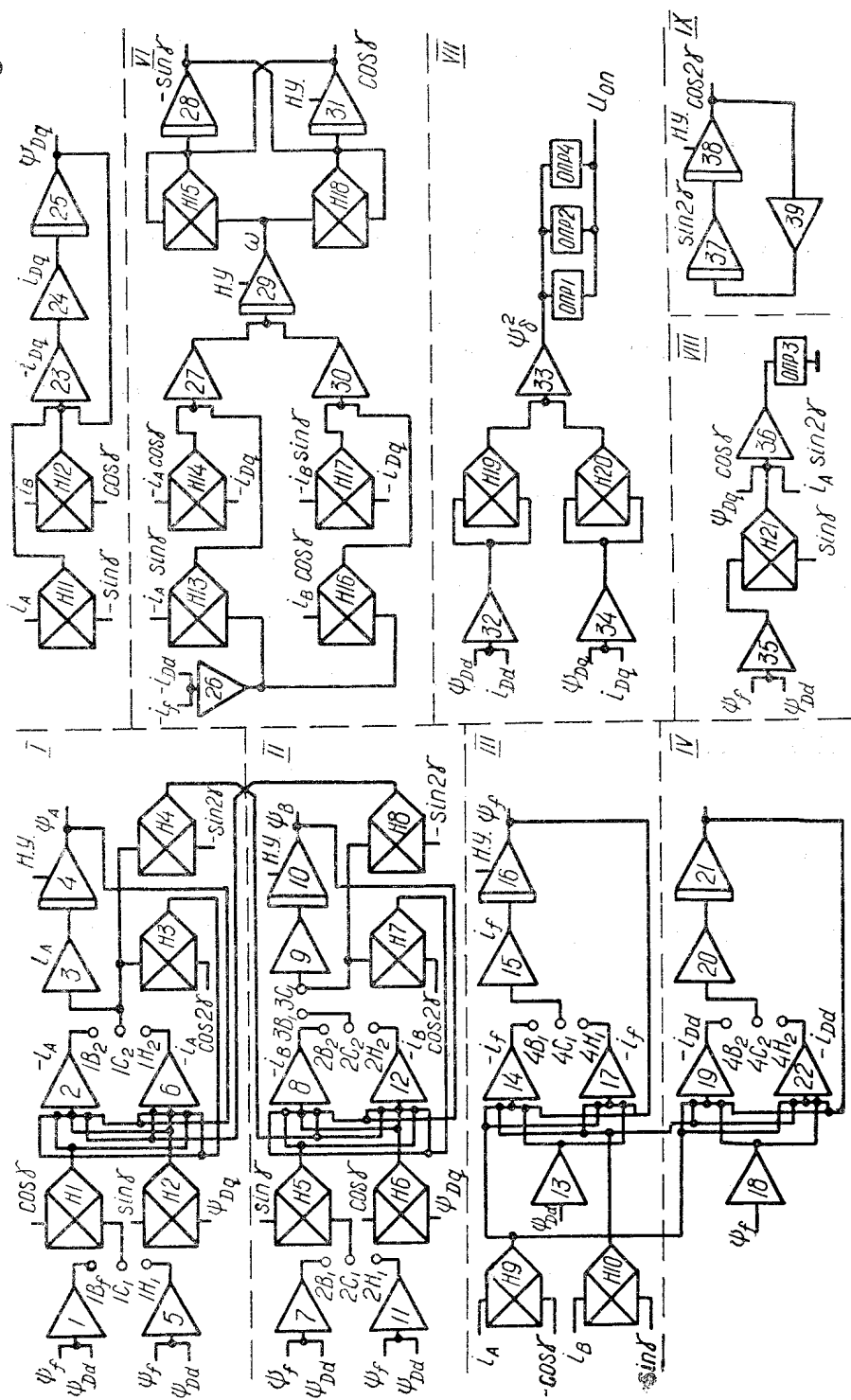


Рис. 2. Блок-схема математической модели импульсного источника

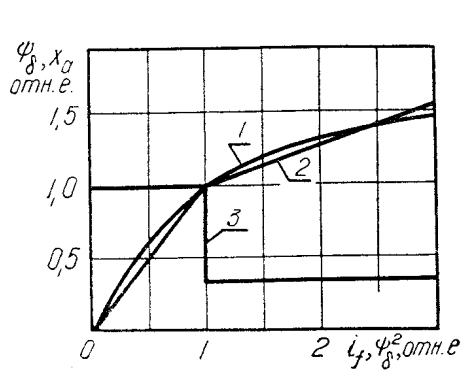


Рис. 3. Нормализованная и аппроксимирующая кривые намагничивания и зависимость $X_a = f(\Psi \delta^2)$

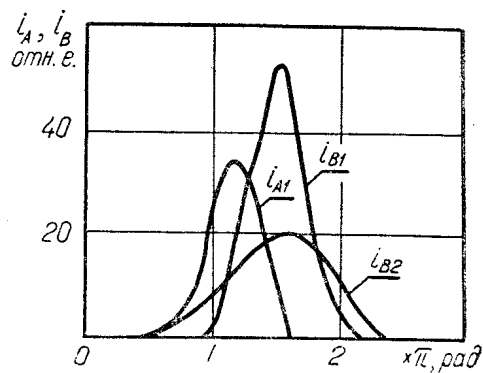


Рис. 4. Кривые токов в фазных обмотках

программу исследований переходных процессов импульсного источника даже на АВМ средней мощности.

Модель дает возможность учитывать изменение скорости вращения ротора и влияние насыщения на переходные процессы в синхронной машине.

Анализ ведется в физических осях, что значительно упрощает обработку результатов решения.

Таким образом, теоретически и экспериментально подтверждена правильность принципов, положенных в основу рассмотренного электромашиного источника энергии, дающего возможность существенно увеличить импульсную мощность без дополнительных источников энергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. К. П. Ковач, И. Рац. Переходные процессы в машинах переменного тока. ГЭИ, 1963.
2. Г. А. Сипайлов, А. В. Лоос, Ю. А. Романов, В. Ф. Сергеев. Электромашинный источник импульсов. Авторское свидетельство № 304681.
3. И. И. Трещев. Методы исследования машин переменного тока. «Энергия», 1969.
4. Г. А. Сипайлов, А. В. Лоос, Э. И. Собко. Математическое моделирование однофазного синхронного генератора. «Электротехника», 1972, № 10.
5. Г. А. Сипайлов, А. В. Лоос, А. А. Щеголев. Электромашинный импульсный источник энергии. Изв. ТПИ, т. 242, 1972.