

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ЭМУ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

М. Л. КОСТЫРЕВ, А. И. СКОРОСПЕШКИН

(Представлена семинаром кафедр электрических машин
и общей электротехники)

В последние годы предложены новые схемы в качестве усилителей мощности, в том числе, бесконтактный «фазочувствительный» электромашинный усилитель с выходом на повышенной нерегулируемой частоте (ЭМУ-ПЧ) [1]. Такой усилитель состоит из обращенного синхронного генератора и асинхронного преобразователя частоты, вращаемых приводным двигателем. Сигнал управления подается на обмотку возбуждения синхронного генератора.

Для электромашинных усилителей характерна работа с ненасыщенной магнитной цепью. Тем не менее, необходимо иметь метод, учитывающий насыщение для расчета режимов с форсировкой напряжения на выходе.

В целях получения компактной экономичной конструкции оба каскада ЭМУ-ПЧ совмещаются в одном магнитопроводе. Вследствие взаимного влияния совмещенных полей невозможно учесть насыщение стали известными методами.

Предлагаемая статья посвящена анализу работы ЭМУ-ПЧ в установившемся автономном режиме и методам расчета его характеристик.

При анализе работы машины исходим из следующих основных допущений:

1. Рассматриваем лишь первые гармонические э.д.с. и н.с., так как в правильно спроектированной машине с симметричной нагрузкой даже при совмещении каскадов доля высших гармонических несущественна [2].

2. Пренебрегаем влиянием вихревых токов в стали и гистерезиса на вид характеристик усилителя.

3. Предполагаем, что ротор усилителя вращается двигателем с абсолютно жесткой механической характеристикой.

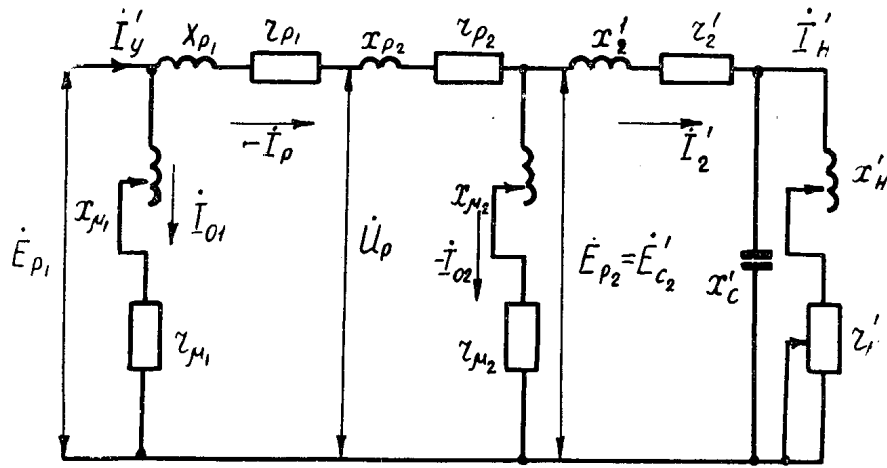
Схема замещения ЭМУ-ПЧ показана на рис. 1. Для увеличения усиления, уменьшения разброса характеристик и улучшения формы напряжения на выходе усилителя включают конденсаторы.

Второй каскад ЭМУ-ПЧ можно рассматривать как асинхронную машину со скольжением

$$S_2 = \frac{f_2}{f_p} = \frac{P_2 \pm P_1}{P_1} \quad (1)$$

P_1 и P_2 — число пар полюсов I и II каскадов.

В наиболее благоприятном с энергетической точки зрения режиме ротор и поле II каскада вращаются согласно (знак + в (1)). В этом режиме энергия передается электрическим путем из I во II каскад.



Р и с. 1. Точная схема замещения ЭМУ-ПЧ.

На схеме замещения, соответствующей этому режиму, активное и индуктивное сопротивление нагрузки r_H' и x_H' , активное и индуктивное сопротивление рассеяния выходной обмотки r_2' и x_2' и сопротивление емкости на выходе x_c' приведены к обмотке ротора II каскада. Так как скольжение S_2 остается постоянным, то удобно определять сопротивления выхода на частоте выхода и приводить их к ротору умножением на коэффициент приведения

$$K = K_{e2} \cdot K_{i2} \quad (2)$$

Коэффициент трансформации токов II каскада

$$K_{i2} = \frac{I_2}{I_2'} = \frac{m_p \cdot W_{p2}'}{m_2 \cdot W_{c2}'} \quad (3)$$

Коэффициент трансформации э.д.с. II каскада

$$K_{e2} = \frac{E_{c2}'}{E_{c2}} = \frac{W_{p2}'}{W_{c2} \cdot S_2} \quad (4)$$

Коэффициент приведения тока управления к ротору для обмотки управления концентрического типа

$$K_{i1} = \frac{I_y}{I_y'} \frac{0,9 m_R \cdot W_{p1}'}{W_y \cdot K_f} \quad (5)$$

m_p и m_2 — число фаз в роторе и на выходе,

W_{p1}' , W_{p2}' , W_{c2}' — число последовательных витков в фазе обмоток ротора I и II каскадов и обмотки выхода с учетом обмоточных коэффициентов,

W_y — число последовательных витков обмотки управления,

K_f — коэффициент формы поля управления [3].

Сопротивления цепей намагничивания I и II каскадов $x_{\mu 1}$ и $x_{\mu 2}$ определяются по известным формулам [3] на частоте ротора для обмоток W_{p1} и W_{p2} . Коэффициенты насыщения при работе на линейном участке характеристики холостого хода можно принять

$$K_{\mu 1} \approx K_{\mu 2} = 1,1 \div 1,3.$$

Точная схема замещения сводится к упрощенной на рис. 2, если вынести цепь намагничивания II каскада на выходные зажимы и пренебречь потерями в стали. Параметры упрощенной схемы

$$\begin{aligned} x_{\mu 2}' &= x_{\mu 2} \cdot \sigma, \\ x_p' &= (x_{p1} + x_{p2}) \cdot \sigma, \\ r_p' &= (r_{p1} + r_{p2}) \cdot \sigma. \end{aligned} \quad (6)$$

Поправочный коэффициент

$$\sigma \approx 1 + \frac{X_{p1} + X_{p2}}{X_{p3}} \quad (7)$$

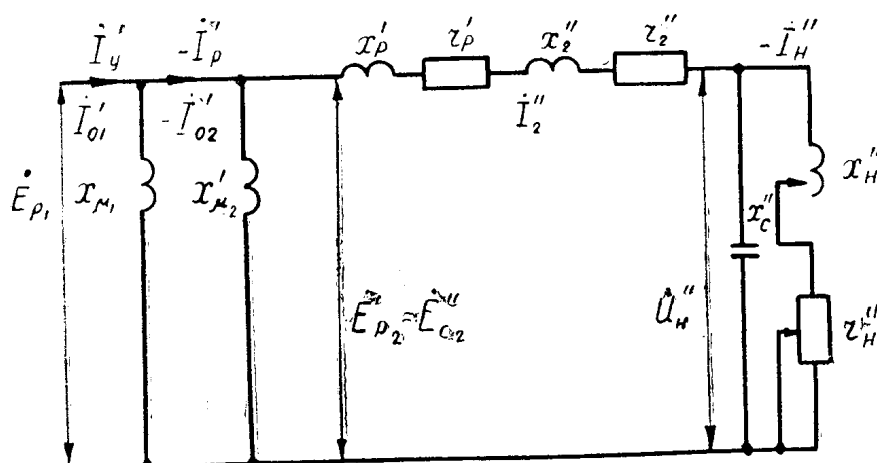


Рис. 2. Упрощенная схема замещения ЭМУ-ПЧ.

Сопротивления x_2'' , r_2'' , x_c'' , x_H'' , r_H'' получаются умножением x_2' , r_2' , x_c' , x_H' , r_H' на σ^2 ,

Рассчитывая внешние характеристики при $I_y = \text{const}$, $x_c = \text{const}$, задаемся значениями r_H , x_H и определяем ток и напряжение на выходе

$$U_H = U_H'' \frac{1}{\sigma \cdot K_{e2}} \quad (8)$$

$$I_H = I_H'' \cdot K_{i2} \cdot \sigma,$$

I_H'' и U_H'' определяются из расчета схемы рис. 2.

Расчет регулировочной характеристики сводится к определению I_y из схемы рис. 2 при $U_H = \text{const}$ и изменении x_H , r_H .

Предложенная методика позволяет рассчитать внешние и регулировочные характеристики ЭМУ-ПЧ с удовлетворительной точностью (10÷20%) при ненасыщенной магнитной цепи, когда индукция на любом стальном участке не превышает 1,4÷1,5 тл.

Достаточно хорошее приближение дает также следующая формула для расчета внешней характеристики:

$$U_H = K_U \cdot U_y \cdot \cos \theta' - X_d I_H \cdot \sin \varphi_H, \quad (9)$$

θ' — угол между векторами н.с. обмотки управления и результирующей э. н. с. 1 каскада при токе нагрузки I_H и коэффициенте мощности нагрузки $\cos \varphi_H$.

$$\sin \theta' = \frac{K_{i1}}{K_{i2}} \cdot \frac{I_H}{I_y} \cdot \cos \varphi_H \quad (10)$$

K_U — коэффициент усиления двух каскадов по напряжению на холостом ходу,

U_y — напряжение, подаваемое на обмотку управления.

Сопротивление x_d определяется из опыта х.х. и К.З на выходе при номинальном токе управления.

Характеристики в насыщенном режиме следует рассчитывать с учетом взаимного влияния совмещенных полей. Первые гармонические н. с. на стальные участки магнитопровода зависят лишь от максималь-

ных индукций совмещенных вращающихся полей и не зависят от начальных углов и взаимной скорости перемещения полей [2].

Можно записать ток намагничивания как сумму составляющей тока на воздушный зазор и на стальные участки магнитопровода.

$$I_{O1} = I_{O\delta_1} + I_{Oст1} = \frac{E_{p1}}{X_{\delta_1}} + f_1(E_{p1}, E_{c2}), \quad (11)$$

$$I_{O2} = I_{O\delta_2} + I_{Oст2} = \frac{E_{c2}'}{X_{\delta_2}} + f_2(E_{p1}, E_{c2}'),$$

X_{δ_1} и X_{δ_2} равны сопротивлениям цепей намагничивания, X_{μ_1} и X_{μ_2} при коэффициентах насыщения $K_{\mu_1} = K_{\mu_2} = 1$.

Н.с. на стальные участки магнитопровода в машине с совмещенными полями определяются через функции Бесселя от максимальных индукций полей [2].

$$I_{Oст1} = f(E_{p1}, E_{c2}') = \frac{P_1}{0,9m_p \cdot W_{p1}'} \cdot [2L_{zp} \cdot \alpha \cdot I_0(\beta V_{zp2}) \cdot I_1(\beta V_{zp1}) + \\ + 2L_{zc} \cdot \alpha \cdot I_0(\beta V_{zc2}) \cdot I_1(\beta V_{zc1}) + \\ \frac{4}{\pi} \cdot L_{ap1} \cdot \alpha \cdot I_0(\beta V_{ap2}) \cdot I_1(\beta V_{ap1}) + \frac{4}{\pi} L_{ac1} \cdot \alpha \cdot I_0(\beta V_{ac2}) \cdot I_1(\beta V_{ac1})]. \quad (12)$$

$$I_{Oст2} = f_2(E_{p1}, E_{c2}') = \frac{P_2}{0,9m_p \cdot W_{p2}'} \cdot [2L_{zp} \cdot \alpha \cdot I_0(\beta V_{zp1}) \cdot I_1(\beta V_{zp2}) + \\ + 2L_{zc} \cdot \alpha \cdot I_0(\beta \cdot V_{zc1}) \cdot I_1(\beta \cdot V_{zc2}) + \frac{4}{\pi} L_{ap2} \cdot \alpha \cdot I_0(\beta V_{ap1}) I_1(\beta_{ap2}) + \\ + \frac{4}{\pi} L_{ac2} \cdot \alpha \cdot I_0(\beta V_{ac1}) \cdot I_1(\beta_{ac2})],$$

$I_0(\beta V)$ и $I_1(\beta V)$ — функции Бесселя чисто мнимого аргумента первого рода нулевого и первого порядка,

L_{zp} , L_{zc} , L_{ap1} , L_{ap2} , L_{ac1} , L_{ac2} — длины участков пути магнитных потоков I и II каскадов в зубцах и ярах ротора и статора.

Амплитуды индукций в зубцах и ярах ротора и статора от полей I и II каскадов V_{zp1} , V_{zp2} , V_{zc1} , V_{zc2} , V_{ap1} , V_{ap2} , V_{ac1} , V_{ac2} определяются через э.д.с. E_{p1} , E_{c2} и размеры машины,

α и β — коэффициенты, зависящие от марки стали и участка кривой намагничивания [2].

Коэффициенты насыщения I и II каскадов определяются через э.д.с.

$$K_{\mu_1} = 1 + \frac{X_{\delta_1}}{E_{p1}} \cdot f_1(E_{p1}, E_{c2}'),$$

$$K_{\mu_2} = 1 + \frac{X_{\delta_2}}{E_{p2}} \cdot f_2(E_{p1}, E_{c2}'). \quad (13)$$

Характеристики машины с учетом взаимного влияния совмещенных полей предлагается рассчитывать методом итераций (последовательных приближений).

Предварительно задавшись коэффициентами насыщения, рассчитываем E_{p1} и E_{c2}' по точной схеме замещения, определяем K_{μ_1} и K_{μ_2} по формуле (13) и повторяем расчет, пока не будет достигнута требуемая точность.

По предложенной методике на ЭЦВМ «Минск-1» были рассчитаны характеристики макета ЭМУ-ПЧ. Функции Бесселя были представле-

ны степенными рядами [4]. Машинное время расчета 5÷6 точек характеристики не превышает 5 мин. при погрешности не более 10 проц.

Предложенная методика применима для расчета характеристик асинхронных бесконтактных преобразователей и других машин совместного типа.

ЛИТЕРАТУРА

1. E. Mishkin, Poly-field Alternating-Current Induction Machines, United States Patent Office, Dec. 27. 1960, N 2966623.

2. В. С. Новокшенов. Исследование асинхронного бесщеточного преобразователя частоты. Диссертация, Томск, 1960.

3. М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. Электрические машины, часть II, Энергия, 1965.

4. Э. Грей и Г. Б. Метьюз. Функции Бесселя и их приложение к физике и механике, ИЛ, 1949.