

## ФАЗОВОЕ КОМПАУНДИРОВАНИЕ БЭМУ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

М. Л. КОСТЫРЕВ, А. И. СКОРОСПЕШКИН

(Рекомендована семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

Фазовое компаундирование широко применяется для статического возбуждения синхронных машин различной мощности. Расчету этих схем применительно к синхронным машинам посвящено значительное число работ [1, 2 и др.]. В настоящей статье рассматриваются вопросы выбора и расчета схем фазового компаундирования с учетом требований к усилителю переменного тока.

Явление реакции якоря в бесконтактном электромашинном усилителе с выходом на повышенной частоте (БЭМУ-ПЧ) (рис. 1) качественно не отличается от процессов в синхронном генераторе [3]. Можно показать, что в установившемся режиме БЭМУ-ПЧ без потерь эквивалентен синхронному неявнополюсному генератору с синхронным сопротивлением.

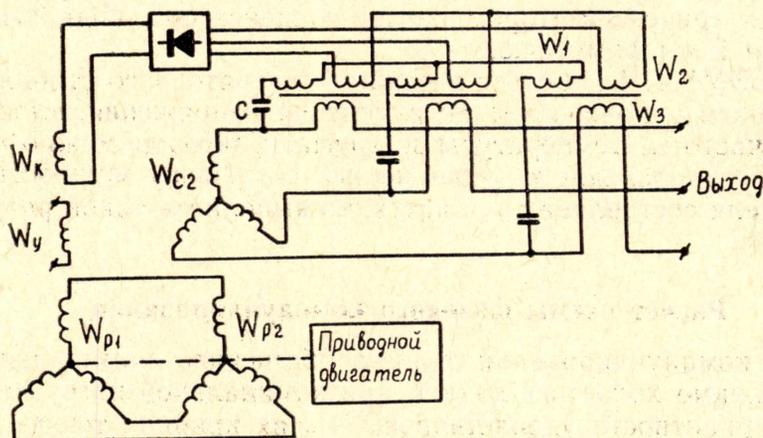


Рис. 1. Схема компаундированного БЭМУ-ПЧ.

$$x_{d3} = \frac{x_{\mu 2} (x_{\mu 1} + x_R)}{(x_{\mu 1} + x_{\mu 2} + x_R) K_{i2} K_{e2}} + x_2, \quad (1)$$

де  $x_{\mu 1}$ ,  $x_{\mu 2}$  — сопротивления цепей намагничивания 1 и 2 каскадов усилителя,

$x_R$  — суммарное сопротивление рассеяния обмоток ротора,

$x_2$  — сопротивление рассеяния выходной обмотки,

$K_{i2}$ ,  $K_{e2}$  — коэффициенты приведения параметров выходной обмотки к ротору.

Известно, что с помощью фазового компаундирования в идеальном синхронном генераторе можно обеспечить полную инвариантность выходного напряжения в установившемся режиме по отношению к нагрузке [4]. Вывод о возможности удовлетворения условий инвариантности справедлив и для идеального БЭМУ с бесконечно большим коэффициентом усиления.

Условия инвариантности можно выполнить при разных соотношениях параметров схемы. При проектировании схем компаундирования синхронных генераторов вводят дополнительные условия: минимум габаритов и веса системы, надежность самовозбуждения и т. д.

К схеме фазового компаундирования БЭМУ предъявляются особые требования: отсутствие самовозбуждения, высокое быстродействие, заданная перегрузочная способность.

### Выбор схемы

Схемы фазового компаундирования отличаются по способу суммирования токов, пропорциональных напряжению и току нагрузки, и по способу управления (коррекции). Из большого числа схем фазового компаундирования следует отметить схемы параллельного компаундирования с конденсаторами в качестве реактивных компаундирующих элементов, как наиболее отвечающие требованиям к БЭМУ. В случае применения дросселей возможно их насыщение при форсировке напряжения на выходе и потеря управляемости. Требование линейности дросселей приводит к возрастанию габаритов и веса системы. Эти соображения относятся и к схеме с трехобмоточным трансформатором, обмотка напряжения которого используется в качестве компаундирующего сопротивления. В схеме с конденсаторами опасность потери управляемости отсутствует. Кроме того, такая схема способствует более быстрому протеканию переходных процессов. В схеме с трехобмоточным трансформатором и конденсаторами имеется возможность настройки и получения требуемого быстродействия, что затруднительно в схеме с двухобмоточным трансформатором, когда конденсаторы подключены непосредственно к выпрямителю.

Если БЭМУ-ПЧ работает в режиме генератора со стабилизированным выходным напряжением, то изменения напряжения, вызванные изменением частоты, температуры и других факторов можно устранить, применив регулирование по отклонению. Поскольку мощность управления усилителя составляет доли ватта, то выполнить такой регулятор не сложно.

### Расчет схемы фазового компаундирования

Схема компаундирования должна обеспечить номинальное напряжение в режиме холостого хода и при номинальной нагрузке. Если условия инвариантности удовлетворены в этих крайних точках, то вследствие линейности характеристик они будут удовлетворены и при промежуточных значениях нагрузки. Из расчета усилителя известны: номинальное фазное напряжение  $U$ , ток нагрузки  $I$  и  $\cos\varphi$  в номинальном режиме, ток возбуждения в режиме холостого хода  $I_{f0}$  и при номинальной нагрузке  $I_{fH}$ , а также сопротивление компенсационной обмотки при рабочей температуре  $r_k$ . Расчетное значение  $r_k$  должно учитывать сопротивление вентиля и защитное сопротивление, подключаемое параллельно обмотке. Расчетное значение тока возбуждения  $I'_{fH}$  с учетом потерь в схеме компаундирования и в компенсационной обмотке можно определить по формуле:

$$I'_{fH} = I_{fH} \left( 1 + \frac{I_{fH}^2 r_k}{\eta \cdot m \cdot U \cdot I} \right), \quad (2)$$

где  $m$  — число фаз на выходе усилителя,

$\eta$  — к. п. д. трансформатора.

Требуется определить коэффициенты трансформации

$$K_H = \frac{W_1}{W_2}, \quad K_T = \frac{W_2}{W_3} \text{ и величину емкости } C.$$

Так как система симметрична, то для симметричной нагрузки можно использовать однофазную схему замещения (рис. 2). Все параметры схемы приведены к обмотке  $W_1$ .

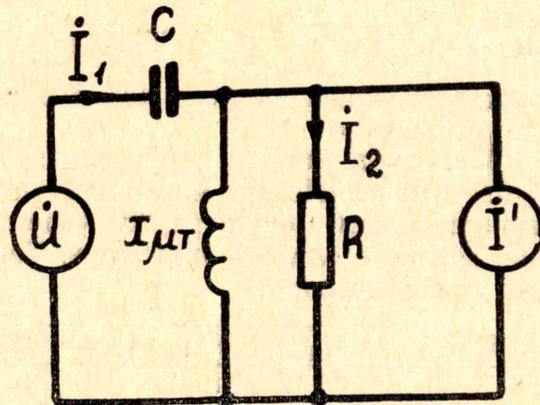


Рис. 2. Схема замещения цепи компаундирования.

Согласно схеме замещения, ток во вторичной обмотке трансформатора

$$\dot{I}_2 = \frac{U + j\dot{I}x_c}{R \left(1 - \frac{x_c}{x_{\mu T}}\right) - ix_c} \quad (3)$$

Знак (+) перед  $\dot{I}$  взят с учетом того, что для правильного геометрического сложения составляющих токов компаундирования обмотки  $W_1$  и  $W_3$  включены встречно. При анализе схемы предполагаем, что

$$\frac{x_c}{x_{\mu T}} \ll 1.$$

Необходимый ток обмотки  $W_k$  в режиме холостого хода можно обеспечить при разных значениях  $x_c$  и  $K_H$ . Для оценки вариантов удобно использовать предложенный В. М. Юсиным [1] параметр

$$\alpha = \frac{R}{\sqrt{x_c^2 + R^2}} \quad (4)$$

Этот параметр изменяется от 0 до 1.

Приведенное сопротивление

$$R = r_k \frac{k_H^2}{\beta_u \cdot \beta_i}, \quad (5)$$

где  $\beta_i$ ,  $\beta_u$  — коэффициенты передачи по току и напряжению выпрямителя

$$\beta_u = \frac{U_{cp}}{U_{\Phi\Phi}}, \quad \beta_i = \frac{I_{\Phi\Phi}}{I_{cp}}.$$

В синхронных генераторах параметр  $\alpha$  выбирают из условий минимума расчетной мощности элементов системы возбуждения, что дает существенную экономию при проектировании машин большой мощности. Этим условиям соответствует оптимальное значение  $\alpha = 0,6-0,8$ .

В БЭМУ-ПЧ важно обеспечить высокое быстродействие при максимальной простоте схемы. Н. с. обмотки управления незначительна, поэтому ее можно выполнить с малой постоянной времени. Тогда быстродействие усилителя будет прежде всего определяться постоянной времени компенсационной обмотки. Включение реактивного сопротивления на стороне переменного тока приводит к ее уменьшению без снижения усиления. Эквивалентная постоянная времени компенсационной обмотки [1]

$$T_{кэ} \approx \frac{L_k}{R_k + x_c/K_H^2} = T_k \frac{\alpha}{\alpha + \sqrt{1 - \alpha^2} \beta_u \beta_i}, \quad (6)$$

где  $T_k$  — собственная постоянная времени компенсационной обмотки при замкнутом роторе.

Из выражения (6) следует, что для уменьшения  $T_{кэ}$  нужно уменьшать  $\alpha$ , выбирая  $\alpha = 0,2$  и менее. Но при малых  $\alpha$  становится значительным, особенно в машинах малой мощности, ток через емкости, подмагничивающее действие которого следует учитывать. Тогда из уравнений (3), (4) коэффициент трансформации

$$K_H = \frac{\alpha U \beta_u + \sqrt{(\alpha U \beta_u)^2 + 4I'_{f0} \cdot \gamma \cdot \alpha \cdot U \beta_u r_k}}{2I'_{f0} r_k} \quad (7)$$

С помощью коэффициента  $\gamma$  емкостный ток приведен к компенсационной обмотке.

$$\gamma = \frac{0, m W'_{c2}}{W'_k} \beta_i \sqrt{1 - \alpha^2}, \quad (8)$$

$W'_{c2}$ ,  $W'_k$  — число витков в фазе выходной обмотки и число витков компенсационной обмотки с учетом их обмоточных коэффициентов.

Расчетный ток возбуждения в режиме холостого хода

$$I'_{f0} = I_{f0} - I'_y,$$

$I_y = (0,1 \div 0,3) I_{f0}$  — величина тока управления, приведенного к компенсационной обмотке.

Величина  $I'_y$  определяется производственными допусками на изготовление усилителя, допусками на конденсаторы, трансформаторы, допустимыми изменениями скорости ротора и т. д. В случае трехобмоточного трансформатора можно выбирать меньшее значение  $I'_y$ , так как имеется возможность подстройки усилителя.

Определив коэффициент  $K_H$ , определяем сопротивление емкости

$$x_c = \frac{U \sqrt{1 - \alpha^2} K_H}{I_{ко} \cdot \beta_i} \quad (9)$$

где ток компенсационной обмотки в режиме холостого хода

$$I_{ко} = \frac{I'_{f0} \cdot K_H}{K_H + \gamma}. \quad (10)$$

Величина емкости выбранного конденсатора не должна превышать значения, соответствующего рассчитанному сопротивлению  $x_c$ .

Коэффициент трансформации  $K_T$  определяется из номинального режима

$$K_T = \frac{I \sqrt{1 - \alpha^2}}{I_{кн} \beta_i (-K \sin \varphi + \sqrt{1 - K^2 \cos^2 \varphi})}. \quad (11)$$

Ток компенсационной обмотки при номинальной нагрузке

$$I_{KH} = I'_{fH} - I'_y - \gamma \sqrt{1-\alpha^2} \cdot \frac{I_{KO}}{K_H}, \quad (12)$$

$$K = \frac{I_{KO}}{I_{KH}}. \quad (13)$$

При использовании выражения (11) нужно считать  $\sin\varphi > 0$  в случае активно-индуктивной нагрузки.

По максимальному напряжению, току перегрузки усилителя и определенным из (6), (11) коэффициентам трансформации рассчитывается трансформатор.

В случае, если  $K_H$  близко или меньше единицы, целесообразно перейти к двухобмоточному трансформатору. Приняв  $K_H = 1$ , определяем

$$\alpha = \frac{I_{KO} \cdot r_K}{U \cdot \beta_u}. \quad (14)$$

При условии  $\alpha^2 \ll 1$  можно считать, что ток  $I_{KO}$  не зависит от  $\alpha$  и равен

$$I_{KO} = \frac{I'_{fo}}{1+\gamma}, \quad (15)$$

где

$$\gamma \approx \frac{0,9m W'_{c2} \beta_i}{W'_K}. \quad (16)$$

По предложенной методике был рассчитан ряд вариантов схемы компаундирования для макета БЭМУ-ПЧ мощностью 300 вт, частотой 200 гц при различных  $\alpha$ . Опытные исследования показали хорошую сходимость с расчетом и подтвердили, что с уменьшением и неизменном коэффициенте усиления эквивалентная постоянная времени нарастания напряжения усилителя при включении тока управления уменьшается (табл. 1).

Таблица 1

$\alpha$	0,4	0,11	0,023	Примечание
I м.сек	80	70	45	$T_y = 25$ м сек
	30	20	15	$T_y < 3$ м сек

Внешние характеристики макета (рис. 3) при  $\alpha = 0,11$  и  $K_H = 1$  (двухобмоточный трансформатор) имеют удовлетворительную жесткость и линейность. Коэффициент усиления при быстродействии 70 м/сек составил более 1200.

Таким образом, предложенная методика позволяет так рассчитать схему компаундирования усилителя, чтобы получить требуемое быстродействие при высоком усилении и удовлетворительных внешних характеристиках.

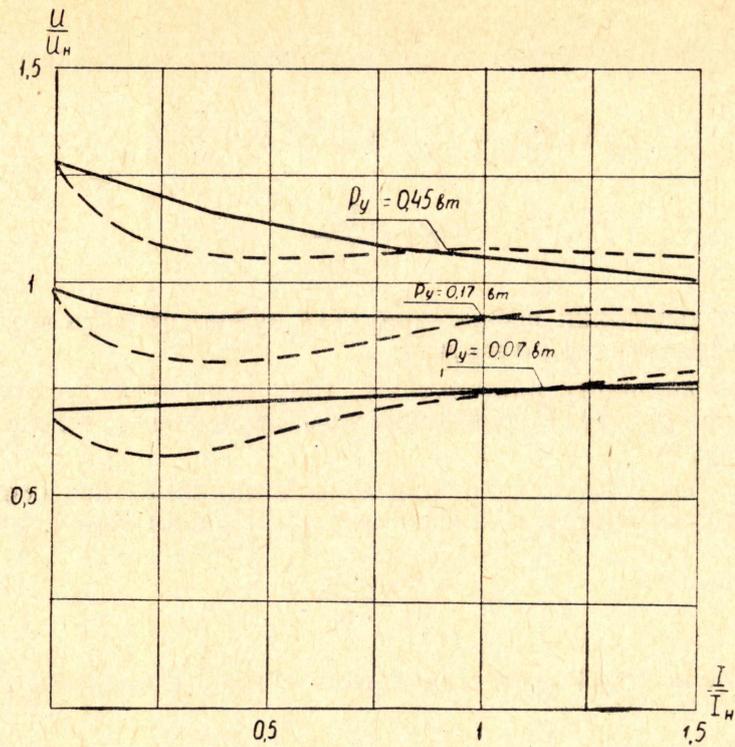


Рис. 3. Внешние характеристики компаундированного БЭМУ-ПЧ.  
 ----  $\cos\varphi = 1$ ,  
 ----  $\cos\varphi = 0,8$  (инд.).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. М. Юсин. Выбор оптимальных параметров статических систем возбуждения. Труды ВЭИ, вып. 73, 1966.
2. Д. В. Вилесов, И. А. Рябинин. Выбор главных параметров схем возбуждения самовозбуждающихся синхронных генераторов. «Электричество», 1960, № 3.
3. М. Л. Костырев, А. И. Скороспешкин. Расчет характеристик ЭМУ переменного тока. Известия Томского политехнического института, т. 160, 1966.
4. Д. В. Вилесов. Автоматизация электроэнергетических систем, часть 1, ВМОЛА, Ленинград, 1961.