

К ВЫБОРУ ВЕЛИЧИНЫ ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА УДАРНОГО ГЕНЕРАТОРА

Г. А. СИПАЙЛОВ, К. А. ХОРЬКОВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

В турбогенераторах нормального исполнения минимальная величина воздушного зазора определяется двумя основными факторами: условием устойчивости при параллельной работе в энергетической системе, допустимым уровнем добавочных пульсационных потерь на поверхности ротора от зубчатости статора. Выполнение этих условий приводит к тому, что в турбогенераторах большой мощности воздушный зазор достигает 50 мм и более. Для преодоления магнитного сопротивления такого зазора требуется большая намагничивающая сила возбуждения, в связи с чем в тепловом отношении обмотка возбуждения является наиболее перегруженной частью турбогенератора.

В генераторах разрывной и ударной мощности, являющихся специальными машинами, работающими изолированно от энергетической системы, вместо условия устойчивости появляются другие условия, определяемые назначением и характером работы генератора. Известно, что в генераторах разрывной и ударной мощности, с целью получения максимальной амплитуды ударного тока, а при однофазном исполнении также для подавления обратносинхронного поля в пазы ротора, наряду с обмоткой возбуждения, закладывается мощная демпферная обмотка занимающая в некоторых случаях до 40% площади паза. В связи с этим наиболее остро встает вопрос о разгрузке обмотки возбуждения, что наиболее эффективно может быть достигнуто за счет снижения величины воздушного зазора.

В существующих генераторах разрывной и ударной мощности величина воздушного зазора примерно, в два раза меньше, чем в турбогенераторах (табл.). В первой строке табл. 1 для турбогенераторов показана мощность в *Мвт*, а для генераторов разрывной и ударной мощности — тип генератора. Однако воздушный зазор по величине все еще значительно превышает значение, допустимое по условиям механической прочности ротора. Причиной, ограничивающей дальнейшее уменьшение величины воздушного зазора, является допустимый уровень пульсаций в кривой э. д. с. обмотки статора. Например, к генераторам ударной мощности, предназначенным для работы в качестве накопителей и источников энергии при импульсном питании обмоток возбуждения ускорителей заряженных частиц, предъявляется требование, чтобы в кривой тока, создающего управляющее магнитное поле ускорителя, не было провалов, вызванных высшими гармоническими. Особенно это важно

для начального участка возрастающей части тока и соответственно магнитного поля до значения, определяемого уровнем инжекции. Поэтому при выборе величины воздушного зазора генераторов ударной мощности следует детально рассмотреть вопрос о влиянии высших, в том числе зубцовых, гармонических на форму кривой тока.

Таблица 1

Мощность генератора (Мвт)	12	25	50	100	150	ТИ-12	ТИ-75	ТО-12	MV-15
D (мм)	870	870	1075	1095	1200	865	1080	850	535
δ (мм)	25,0	28,0	42,5	47,5	62,5	22,5	20,0	12,5	6,35
$\frac{\delta}{D}$	0,029	0,032	0,039	0,043	0,052	0,026	0,018	0,015	0,012

Принимая во внимание, что в ударных генераторах, работающих на индуктивную нагрузку, активное сопротивление как генератора, так и нагрузки значительно меньше реактивного, можно, допуская некоторую погрешность с целью упрощения математических выкладок, считать коэффициент затухания тока равным единице. Тогда выражение для тока можно представить в следующем виде:

$$i = \sum_{\nu=1}^{\infty} \left[\frac{E_{\nu}}{\nu\omega L} \cos \psi_0 - \frac{E_{\nu}}{\nu\omega L} \cos(\nu\omega t + \psi_0) \right], \quad (1)$$

где $L = L_2 + L_n$ — суммарная индуктивность генератора и нагрузки,
 ν — порядок гармонической,
 ω — угловая частота,
 ψ_0 — начальная фаза включения.

Режим работы генератора ударной мощности будет оптимальным, если включение его на нагрузку происходит в момент прохождения э. д. с. E_1 через нулевое значение, то есть при $t = 0$, $E_1 = 0$ и $\psi_0 = 0$. Тогда

$$i = \sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{E_{\nu}}{\nu\omega L} (1 - \cos \nu\omega t). \quad (1a)$$

Используя уравнение (1a), можно найти условие, при котором кривая тока, представляющая сумму основной и ν -тых гармонических, не будет иметь провалов. Для этого необходимо, чтобы производная в любой точке нарастающей части кривой тока была больше нуля

$$\frac{d}{dt} \sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{E_{\nu}}{\nu\omega L} (1 - \cos \nu\omega t) > 0. \quad (2)$$

Учитывая, что индуктивность L имеет только положительные значения, ее можно исключить из неравенства (2). Тогда после дифференцирования этого неравенства и выделения основной гармонической из общей суммы, получим:

$$E_1 \sin \omega t + \sum_{\nu=3}^{\infty} E_{\nu} \sin \nu\omega t > 0. \quad (3)$$

Так как $E_1 \sin \omega t$ при $0 < \omega t < \pi$ всегда является положительной величиной, то условие (3) будет выполняться, если

$$E_1 \sin \omega t > \left| \sum_{v=3}^{\infty} E_v \sin v\omega t \right|. \quad (4)$$

Из всей суммы высших гармонических э. д. с. наибольший вес (до 90—95 % от $\sum_{v=3}^{\infty} E_v \sin v\omega t$), имеют зубцовые гармонические, поэтому целесообразно рассмотреть взаимодействие основной гармонической тока именно с ними. Условие (4) для основной гармонической и для какой-либо одной v -той гармонической, имеющей преобладающее значение, будет иметь вид:

$$E_1 \sin \omega t > |E_v \sin v\omega t|,$$

откуда

$$\frac{E_v}{E_1} < \left| \frac{\sin \omega t}{\sin v\omega t} \right|. \quad (5)$$

Из рис. 1, на котором представлена кривая тока, полученная в результате сложения основной и v -той гармонической тока, следу-

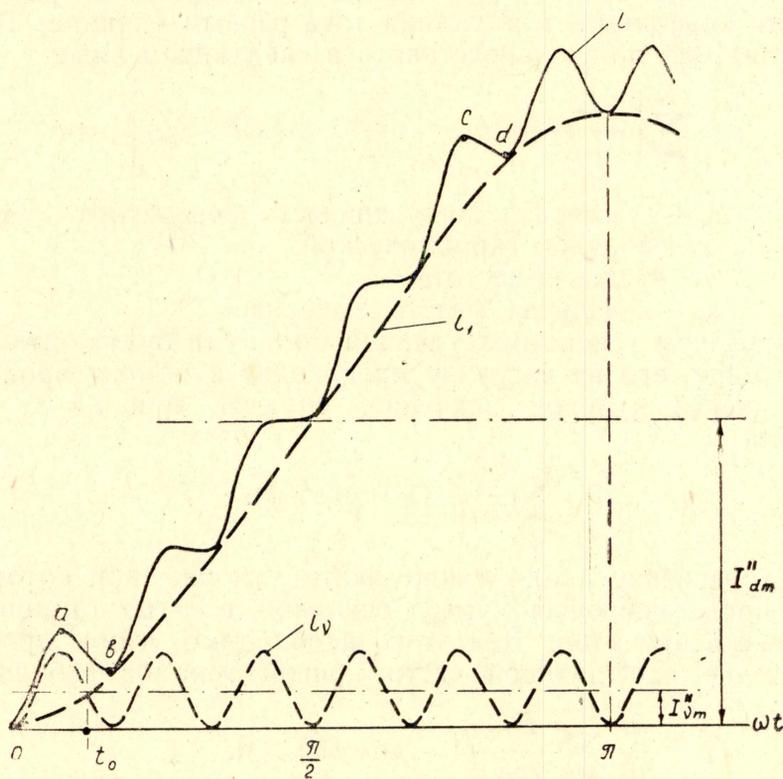


Рис. 1. К выбору допустимой амплитуды v -той гармонической.

ет, что наиболее опасной точкой, в отношении появления провала в нарастающей части тока, является точка (б), соответствующая моменту времени $t = T_v$, где T_v — период v -той гармонической. Условие отсутствия провала в точке (б) будет достаточным, если касательные к любой точке участка кривой между точками (а) и (б) будут иметь

В связи с тем, что в общем случае невозможно дать допустимые значения амплитуд всех высших гармонических, так как они зависят не только от соотношения между числами зубцов статора и ротора, но и от открытий пазов величины воздушного зазора, числа заполненных обмоткой пазов и т. д., будет рациональным ввести коэффициент искажения кривой э. д. с., который и определял бы допустимую величину пульсаций. При определении коэффициента, искажения $\kappa_{и}$ целесообразно исключить высшие гармонические с относительно большим периодом $\nu = 3, 5, 7, 9$, а также гармонические 11, 13 и 15, амплитудные значения которых близки к нулю. Таким образом

$$\kappa_{и} = \frac{\sqrt{E_{17}^2 + E_{19}^2 + \dots + E_{z_1' \pm 1}^2 + \dots + E_{z_2' \pm 1}^2 + \dots}}{E_1} \quad (7)$$

Значения допустимого коэффициента искажения кривой э. д. с. для соотношения между числами зубцов статора и ротора

$$z_2' = z_1' \pm 4,$$

которое можно считать наиболее благоприятным для генераторов ударной мощности, представленными в табл. 3.

Таблица 3

z_1'	24	30	36	42	48	54	60	66
$\kappa_{и} \%$	9,0	7,0	6,0	5,5	5,0	4,5	4,0	3,5

Так как наличие высших гармонических в кривой э. д. с. статора, главным образом, зависит от величины воздушного зазора и от степени открытия пазов статора $b_{ос}$ и ротора $b_{ор}$, то удобнее всего связать выбор величины зазора с относительной величиной открытия пазов статора и ротора

$$b_{отн} = \frac{b_{ос} + b_{ор}}{2\delta} \quad (8)$$

Экспериментальные исследования, проведенные на установке, описанной ранее [1], позволяют установить связь между коэффициентом искажения кривой э. д. с. обмотки статора и относительной величиной открытия пазов статора и ротора, которая необходима для определения δ . Исследуемый генератор с однофазной однослойной обмоткой на статоре при $z_1' = 24$ и $b_{ос} = 3,5$ мм имел три сменных ротора с $z_2' = 20, 26$ и 28 и соответственно $b_{ор} = 6,5; 6$ и $6,5$ мм. Изменение относительного открытия пазов машины достигалось для каждого отдельного ротора увеличением воздушного зазора машины путем проточки ротора. Для поддержания значения индукции в зазоре на одном уровне, одновременно с увеличением зазора увеличивался соответствующим образом ток возбуждения. Результаты экспериментальных исследований представлены в табл. 4 в виде процентного содержания высших гармонических в кривой э. д. с. обмотки статора, при этом в таблице пропущены значения высших гармонических э. д. с. от 9 до 15 включительно, так как их амплитуды близки к нулю. По данным табл. 4, построены зависимости коэффициента искажения от относительного открытия пазов (рис. 2). Пользуясь

В связи с тем, что в общем случае невозможно дать допустимые значения амплитуд всех высших гармонических, так как они зависят не только от соотношения между числами зубцов статора и ротора, но и от открытий пазов величины воздушного зазора, числа заполненных обмоткой пазов и т. д., будет рациональным ввести коэффициент искажения кривой э. д. с., который и определял бы допустимую величину пульсаций. При определении коэффициента, искажения $\kappa_{и}$ целесообразно исключить высшие гармонические с относительно большим периодом $\nu = 3, 5, 7, 9$, а также гармонические 11, 13 и 15, амплитудные значения которых близки к нулю. Таким образом

$$\kappa_{и} = \frac{\sqrt{E_{17}^2 + E_{19}^2 + \dots + E_{z_1' \pm 1}^2 + \dots + E_{z_2' \pm 1}^2 + \dots}}{E_1} \quad (7)$$

Значения допустимого коэффициента искажения кривой э. д. с. для соотношения между числами зубцов статора и ротора

$$z_2' = z_1' \pm 4,$$

которое можно считать наиболее благоприятным для генераторов ударной мощности, представленными в табл. 3.

Таблица 3

z_1'	24	30	36	42	48	54	60	66
$\kappa_{и} \%$	9,0	7,0	6,0	5,5	5,0	4,5	4,0	3,5

Так как наличие высших гармонических в кривой э. д. с. статора, главным образом, зависит от величины воздушного зазора и от степени открытия пазов статора $b_{ос}$ и ротора $b_{ор}$, то удобнее всего связать выбор величины зазора с относительной величиной открытия пазов статора и ротора

$$b_{отн} = \frac{b_{ос} + b_{ор}}{2\delta} \quad (8)$$

Экспериментальные исследования, проведенные на установке, описанной ранее [1], позволяют установить связь между коэффициентом искажения кривой э. д. с. обмотки статора и относительной величиной открытия пазов статора и ротора, которая необходима для определения δ . Исследуемый генератор с однофазной однослойной обмоткой на статоре при $z_1' = 24$ и $b_{ос} = 3,5$ мм имел три сменных ротора с $z_2' = 20, 26$ и 28 и соответственно $b_{ор} = 6,5; 6$ и $6,5$ мм. Изменение относительного открытия пазов машины достигалось для каждого отдельного ротора увеличением воздушного зазора машины путем проточки ротора. Для поддержания значения индукции в зазоре на одном уровне, одновременно с увеличением зазора увеличивался соответствующим образом ток возбуждения. Результаты экспериментальных исследований представлены в табл. 4 в виде процентного содержания высших гармонических в кривой э. д. с. обмотки статора, при этом в таблице пропущены значения высших гармонических э. д. с. от 9 до 15 включительно, так как их амплитуды близки к нулю. По данным табл. 4, построены зависимости коэффициента искажения от относительного открытия пазов (рис. 2). Пользуясь

Таблица 4

z_2'	γ δ_{MM}												$\sum_3^{31} E_y$
		3	5	7	17	19	21	23	25	27	29	31	
20	0,50	0,65	0,50	0,30	0,30	7,40	0,30	0,73	0,81	0,00	0,10	0,10	7,5
	0,75	0,65	0,45	0,24	0,15	5,70	0,60	0,51	0,30	0,00	0,00	0,00	5,8
	1,00	0,65	0,50	0,20	0,15	4,70	0,40	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	4,8
	1,50	0,65	0,45	0,20	0,10	3,95	0,10	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	4,0
26	1,00	0,50	0,70	0,50	0,20	0,40	0,00	3,00	27,5	3,00	1,40	0,30	27,8
	2,00	0,30	0,65	0,40	0,00	0,10	0,00	1,45	12,3	1,45	0,75	0,20	12,5
	3,00	0,30	0,70	0,40	0,00	0,10	0,00	1,00	9,70	1,10	0,60	0,00	9,85
	4,00	0,30	0,50	0,25	0,00	0,10	0,00	0,60	3,98	0,65	0,00	0,00	4,12
28	0,50	0,45	0,50	0,50	0,05	0,20	0,00	1,85	0,80	1,60	6,30	0,60	6,90
	0,75	0,30	0,50	0,45	0,00	0,00	0,00	1,38	0,30	1,15	4,60	0,35	5,00
	1,00	0,25	0,50	0,45	0,00	0,00	0,00	1,25	0,20	0,90	3,30	0,20	3,70
	1,50	0,25	0,50	0,40	0,00	0,00	0,00	1,00	0,10	0,50	2,50	0,10	2,8

этими зависимостями можно определить величину $b_{отн}$, при которой пульсации э. д. с. для каждого конкретного случая будут находиться в допустимых пределах.

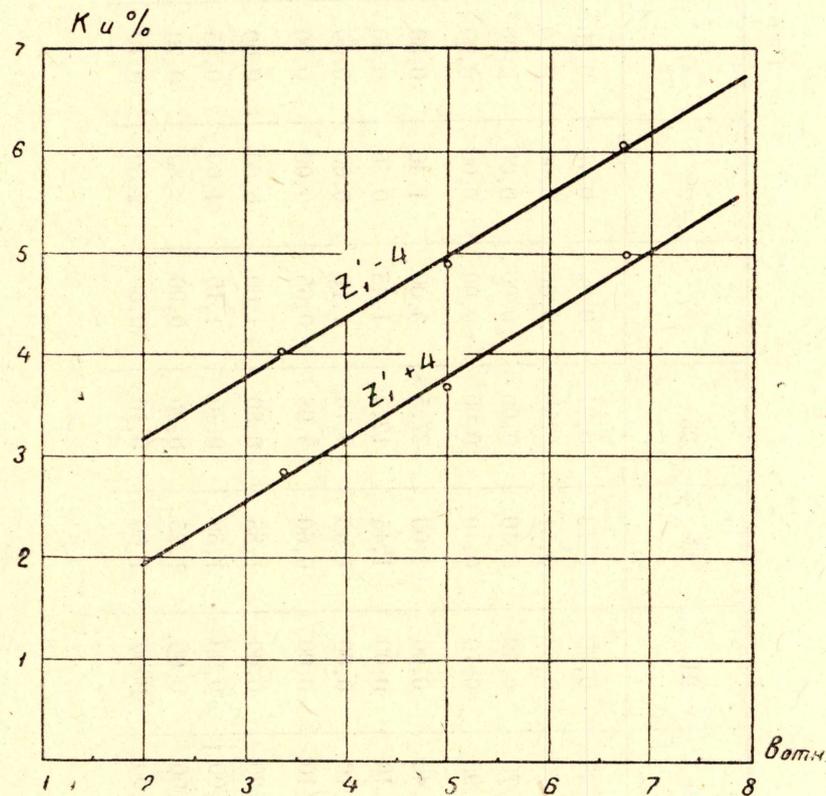


Рис 2. Зависимость $\kappa_u = f(b_{отн})$ при $z'_2 = z'_1 \pm 4$.

Подстановкой в выражение (8) значений

$$b_{ос} = \kappa_{п1} \frac{\pi D}{z'_1} \text{ и } b_{ор} = \kappa_{п2} \frac{\pi(D - 2\delta)}{z'_2}$$

можно получить расчетную формулу для определения величины воздушного зазора

$$\delta \geq \frac{b_{ос} + b_{ор}}{2b_{отн}} = \frac{\pi D}{z'_1} \frac{\kappa_{п1} z'_2 + \kappa_{п2} z'_1}{2(\kappa_{п2} + b_{отн} z'_2)}, \quad (9)$$

где $\kappa_{п1}$ и $\kappa_{п2}$ — отношение ширины паза статора и ротора к соответствующему зубцовому делению.

Не внося в формулу (9) ощутимых погрешностей, можно пренебречь величиной $\pi \kappa_{п2} \leq 1,57$, стоящей в скобках знаменателя, по сравнению с величиной $b_{отн} z'_2$, тогда

$$\delta \geq \frac{\pi D}{2b_{отн}} \frac{\kappa_{п1} z'_2 + \kappa_{п2} z'_1}{z'_1 \cdot z'_2}. \quad (10)$$

Пользуясь кривыми (рис. 2) и формулой (10) можно выразить величину воздушного зазора рассматриваемого генератора через его диаметр. Например, для допустимого значения $\kappa_u = 4\%$ (рис. 2) при открытых пазах на статоре и роторе ($\kappa_{п1} = 0,5$ и $\kappa_{п2} = 0,5$) получим

$$\delta \approx 0,01 D$$

Установленная связь между степенью допустимого искажения кривой э. д. с. обмотки статора и относительной величиной открытия пазов статора и ротора позволяет определить оптимальную величину зазора при проектировании генераторов ударной мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. А. Сипайлов, К. А. Хорьков. Вопросы теории и проектирования электрических машин. Межвузовский сборник трудов, выпуск 3, Новосибирск, 1963.