

Н. Г. ШИФЯН

НАГРЕВ ЯВНОПОЛЮСНЫХ РОТОРОВ ТОКАМИ РАЗНЫХ ЧАСТОТ

Практика проектирования и эксплуатации современных высокопроизводительных машин выдвигает задачу создания метода расчета дополнительных потерь и обусловленного ими нагрева. Проведение экспериментов для определения дополнительных потерь и обусловленных ими превышений температуры на крупных машинах сопряжено с трудностями, которые в настоящее время представляются практически неодолимыми. Поэтому приходится вести исследования на машинах небольшой мощности, имеющих в принципе такую же конструкцию, как и крупные машины, и затем, полученные выводы распространить с известным приближением на крупные машины. К электрическим машинам с принудительной вентиляцией применим принцип наложения превышений температуры [1]. Поэтому превышения температуры, обусловленные гармониками тока статора при работе генератора на несинусоидальную нагрузку, можно отдельно определять для каждой гармоники.

Сущность проведенных автором экспериментов состояла в следующем. К статору синхронного генератора, приводимого во вращение синхронным двигателем, поочередно подводились трехфазные напряжения разных частот и определялись превышения температуры на вращающемся роторе при замкнутой накоротко обмотке возбуждения.

В качестве испытуемой машины был взят синхронный двигатель типа СД 102-8 ($P_n = 75 \text{ кВт}$, $U_n = 380 \text{ в}$, $\cos \varphi = 0,9$ (опер.), $n = 750 \text{ об/мин}$).

Опыты нагрева были проведены:

на роторе 1 с полюсами, набранными из листовой стали ($\Delta = 1 \text{ мм}$) с полной успокоительной обмоткой из меди. Отношение веса успокоительной обмотки к весу меди обмотки возбуждения $m = 0,225$;

на роторе 2 с теми же полюсами, но с неполной успокоительной обмоткой (конструкция успокоительной обмотки позволяла разомкнуть соединительные сегменты между полюсами);

на роторе 3 с теми же полюсами, но без успокоительной обмотки.

Местные превышения температуры контуров ротора были определены с помощью термопар медь-константан. Методика измерений подробно изложена в [2]. Э.д.с. термопар определялась компенса-

ционным методом. Погрешность при измерениях превышений температуры на роторе 1 составляла примерно 1°C. Позднее точность измерений была повышена и для роторов 2 и 3 погрешность не превышала 0,5°C. Термодатчики были заложены во все стержни успокоительной обмотки, в железо наконечника и на участках соединительного сегмента между стержнями (рис. 1). В катушку полюса термодатчики были заложены по высоте и по длине.

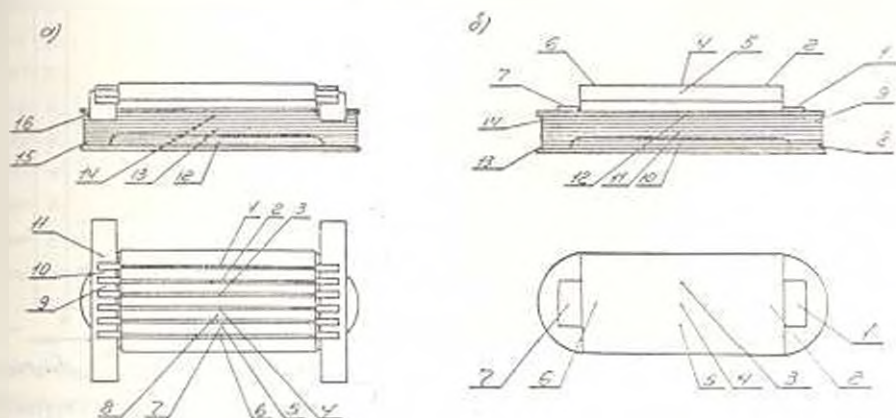


Рис. 1. Схема расположения термодатчиков на полюсе: а — на роторах 1 и 2, б — на роторе 3.

Ввиду малости размеров наконечника и хорошей теплопередачи между его элементами, превышения температуры всех стержней и поверхности полюсного наконечника на середине длины полюса с успокоительной обмоткой были одинаковы. Для полюса без успокоительной обмотки превышения температуры были одинаковы в точках поверхности наконечника на середине его длины. За превышение температуры всего наконечника принималось превышение температуры на середине его длины. За превышение температуры обмотки возбуждения принималось среднее превышение температуры, определенное методом сопротивления.

Опыты нагрева испытуемой машины были проведены при неизменном действующем значении тока статора преимущественно в интервале частот 10–340 гц. Экспериментальные данные, полученные из опытов нагрева, были использованы для решения уравнений частных превышений температуры, составленных для наконечника и катушки полюса. Частичное превышение температуры элементов ротора, обусловленное потерями в статоре, пренебрежимо мало [2]. Из уравнений были определены превышения температуры наконечника θ_n и катушки θ_k полюса, обусловленные потерями только в них самих.

На рис. 2, 3 и 4 представлены зависимости θ_n и θ_k от частоты. Для всех трех роторов θ_n значительно больше θ_k .

Параллельно с измерением температур измерялась электрическая мощность, подведенная к статору испытуемой машины. Потери в роторе при разных частотах тока равны:

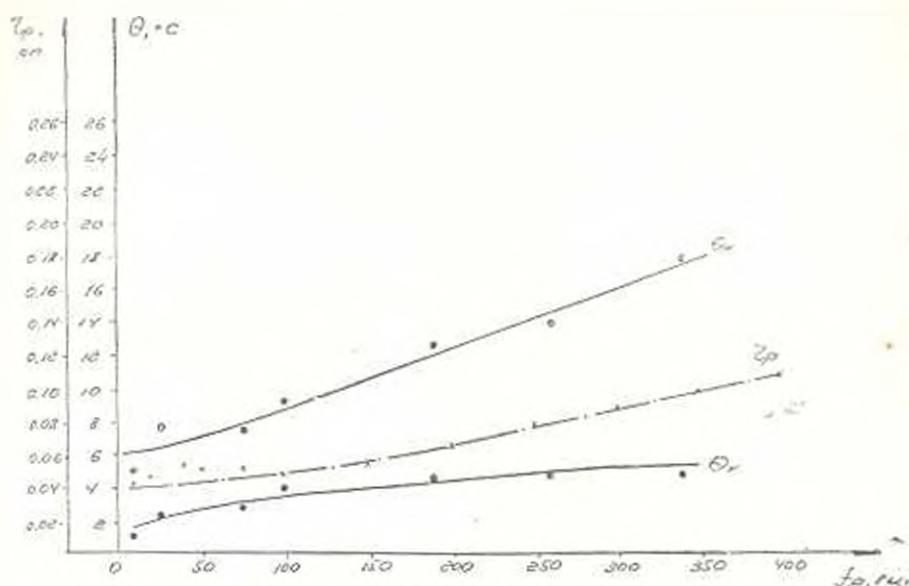


Рис. 2. Зависимости от частоты превышения температуры наконечника и катушки возбуждения ротора 1 при вращении и $I = 60$ а: r_p — частотная характеристика активного сопротивления ротора 1

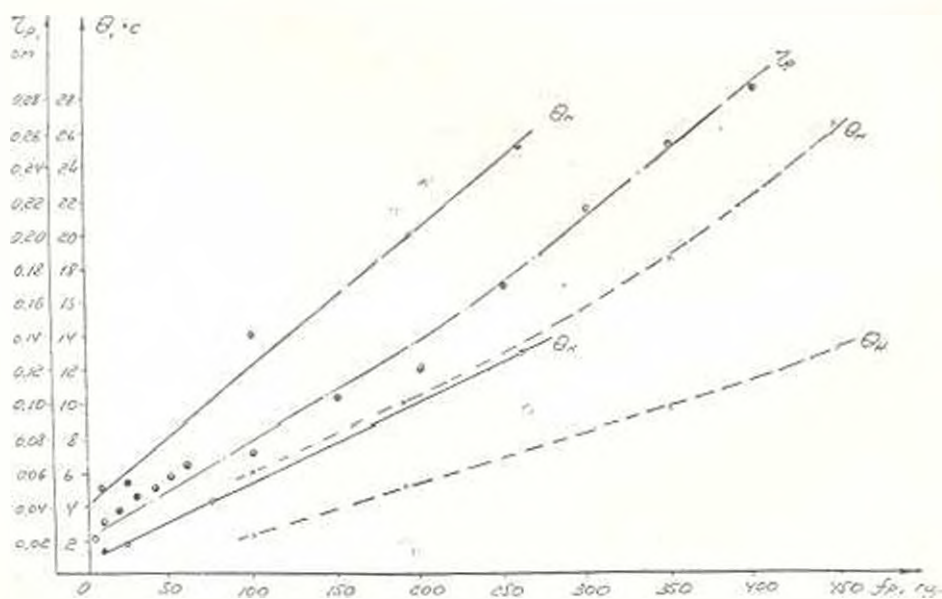


Рис. 3. Зависимость от частоты превышения температуры наконечника и катушки ротора 2 при вращении: — при $I_k = 60$ а; — при $I_k = 45$ а: r_p — частотная характеристика активного сопротивления ротора 2.

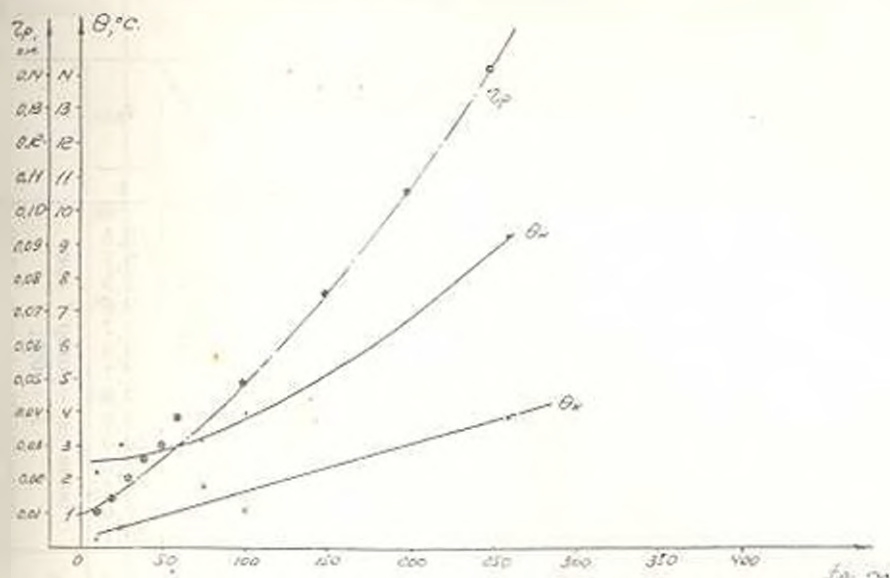


Рис. 4. Зависимость от частоты вращения температуры наконечника и катушки возбуждения ротора β при вращении и $I_s = 35$ а; θ_p — частотная характеристика сопротивления ротора β

$$\Delta P_p = (P_c \mp \Delta P_c) (-s), \quad (1)$$

где P_c — мощность, подводимая к статору при разных частотах тока;

$\Delta P_c = 3I_s^2 r_{ca}$ — потери в меди обмотки статора;

I_s — действующее значение тока статора при разных частотах;

r_{ca} — активное сопротивление фазы обмотки статора токам разных частот при температуре, полученной в опыте нагрева [3];

s — скольжение ротора относительно поля статора.

При положительном s (режим двигателя или электромагнитного тормоза) перед ΔP_p необходимо взять знак $(-)$.

Для проверки потери в роторах 1 и 2 определялись также со стороны приводного двигателя, предварительно тарированного.

Полученные данные по измерениям потерь приведены в табл. 1. При разных частотах произведено разделение потерь в полюсах на потери в наконечниках ΔP_n и потери в обмотке возбуждения $\Delta P_{об}$

$$\Delta P_{об} = I_p^2 r_{об}, \quad (2)$$

где I_p — ток, наведенный в обмотке возбуждения, при разных частотах тока статора;

$r_{об}$ — активное сопротивление обмотки возбуждения токам разных частот при температуре, полученной в опыте нагрева испытуемой машины [4]

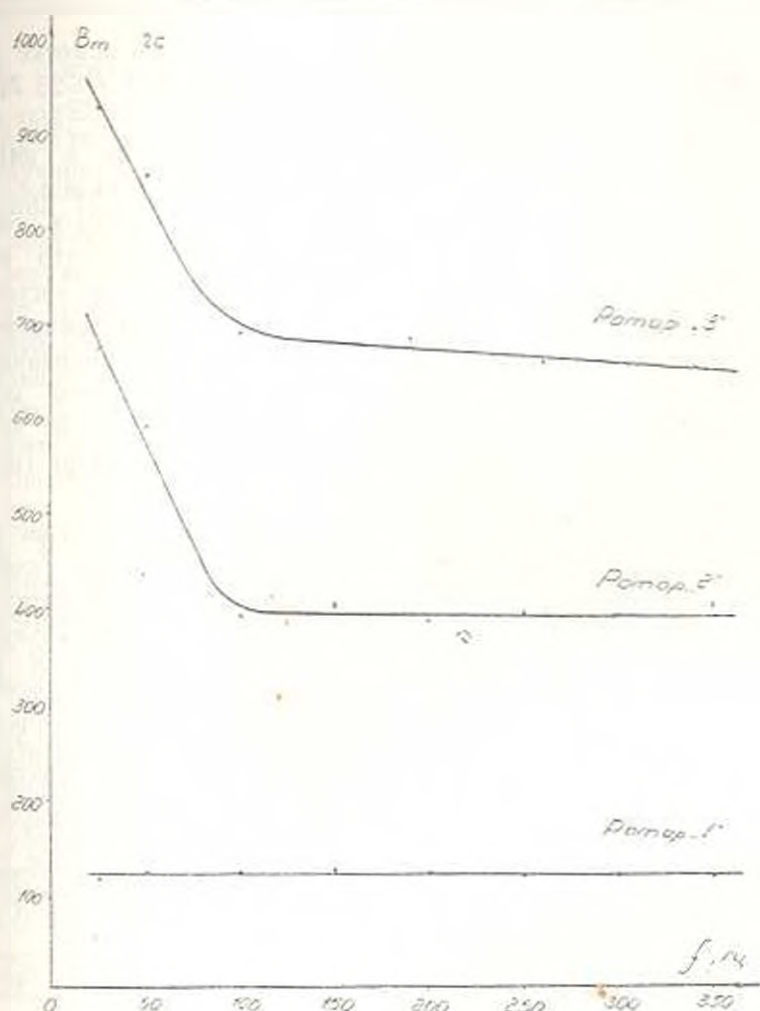
$$\Delta P_n = \Delta P_p - \Delta P_{об}. \quad (3)$$

Таблица 1

Частота, ω	ΔP_{Σ} (со стороны статора НМ)	ΔP_{Σ} (со стороны возбуждения)	$\Delta P_{\text{об}}$	ΔP_{Σ}	$\frac{\Delta P_{\Sigma}}{\Delta P_{\Sigma}}$	$\frac{\Delta P_{\text{об}}}{\Delta P_{\Sigma}}$	$\frac{I_{\Sigma}}{I_{\text{об}}}$	I_{Σ}	Численность роторов I при $I_{\Sigma} = 100$ численность роторов I при $I_{\Sigma} = 35$
	б	в	г	д	долевые единицы			а	
10	84	311	17	367	0,96	22	4,8	9,5	
20	75	—	26	49	0,65	1,89	5,7	9,7	
—	885	—	17	848	0,98	49	2,9	7,9	
75	820	627	40	790	0,95	20	2,4	9,8	
—	—	—	100	—	—	—	2,7	7,7	
100	864	767	60	804	0,93	13,5	2,2	9,9	
—	344	—	206	138	0,40	0,67	2,6	7,7	
190	1020	959	135	885	0,87	6,0	2,9	9,8	
—	671	—	326	335	0,50	1,0	—	7,0	
260	1310	1155	216	1094	0,835	5,1	2,8	10,0	
—	870	—	423	457	0,53	1,08	2,3	7,6	
340	1570	1489	316	1254	0,80	4	3,5	10,1	
—	—	—	—	—	—	—	—	10,1	
10	415	400	32	383	0,925	12,0	3,7	10,3	Численность роторов I при $I_{\Sigma} = 100$ численность роторов I при $I_{\Sigma} = 35$
25	757	593	40	717	0,947	15,0	2,68	8,35	
—	—	—	—	—	—	—	—	10,3	
75	—	869	75	791	0,911	10,6	2,0	7,7	
—	—	—	—	—	—	—	—	7,6	
100	1191	1267	92	1102	0,925	12,0	2,2	10,3	
—	661	—	52	612	0,92	11,7	1,7	7,8	
190	1320	—	202	1018	0,89	8,0	—	10,6	
—	1018	—	111	907	0,89	8,15	1,74	7,8	
260	2150	2456	300	2144	0,877	7,0	2,0	10,6	
—	—	—	—	—	—	—	—	7,9	
350	—	—	—	—	—	—	—	10,5	
—	1983	—	261	1722	0,87	6,6	1,6	7,8	
450	—	—	—	—	—	—	—	—	
—	2520	—	360	2130	0,845	5,5	2,0	7,8	

Из табл. 1 видно, что потери в наконечниках роторов 1 и 2 значительно больше, чем в обмотке возбуждения. Однако с возрастанием частоты доля потерь в обмотке возбуждения в полных потерях и роторе несколько возрастает.

На рис. 5 приведены зависимости результирующей индукции в зазоре от частоты для всех трех роторов при неизменном действующем значении тока статора. Обмотки возбуждения роторов замкнуты накоротко. Индукция определялась по э.д.с. проводника, уложенного на поверхности полюсного наконечника. Измерения производились на неподвижных роторах, так как при этом э.д.с. проводника практически изменяется по синусоидальному закону. Э.д.с. определялась с помощью лампового вольтметра типа Ф517 с $R_{\text{вн}} = 0,3 \text{ Мом}$. Измерения, произведенные при разных значениях тока статора, показали, что изменение индукции в зазоре прямо пропорционально току. Это вполне объяснимо, если учесть, что значительная часть пути переменного потока в зазоре проходит по воздуху. Крутой загиб вверх кривых индукции, имеющий место при низких частотах, объясняется

Рис. 5. Зависимость индукции в зазоре от частоты при $I_c = 352$.

уменьшением экранирующего действия ротора, которое зависит также от конструкции успокоительной системы.

Результирующий магнитный поток в зазоре остается практически неизменным в интервале частот $25 \div 350$ Гц для ротора 1, в интервале частот $100 \div 350$ Гц — для ротора 2 и мало изменяется в интервале частот $100 \div 350$ Гц — для ротора 3. Поэтому можно считать, что в указанных интервалах частот м.д.с., создающая результирующий магнитный поток, практически неизменна по величине. Эта м.д.с. получается от сложения м.д.с. обмотки статора с м.д.с. контуров ротора. Вследствие неизменности действующего значения токов разных частот статора, величина м.д.с. обмотки статора не зависит от частоты. Поэтому м.д.с. ротора тоже должна оставаться практически неизменной. Она состоит из м.д.с. успокоительной обмотки, контуров в стали и обмотки возбуждения. В последней графе табл. 1 приведены значения токов, наведенных в обмотке возбуждения при соответствующих

щих токах разных частот статора. Величина тока в обмотке возбуждения практически не зависит от частоты, начиная с $f = 25$ гц. Поэтому м.д.с. обмотки возбуждения в интервале частот 25—350 гц практически неизменна. Тогда можно предположить, что в интервалах частот, соответствующих роторам 1, 2 и 3, суммарная м.д.с. остальных контуров ротора (успокоительная обмотка, контуры в стали наконечника) тоже не зависит от частоты. Это означает, что величина тока в контурах полюсного наконечника в интервалах частот, соответствующих роторам 1, 2 и 3, остается практически неизменной.

Когда токи в контурах не зависят от частоты, изменение потерь обусловлено только изменением активного сопротивления контуров. Поэтому зависимость активного сопротивления контура от частоты в некотором масштабе должна выражать зависимость потерь (превышения температуры) в контуре от частоты.

На рис. 2, 3 и 4 нанесены также частотные характеристики активных сопротивлений роторов $r_p = r(f)$, представляющие собою зависимость от частоты активного сопротивления, эквивалентирующего активные сопротивления всех контуров ротора. Частотная характеристика определялась при подведении к статору испытуемой машины трехфазного напряжения разных частот и при неподвижном роторе, обмотка возбуждения которого замкнута накоротко [2, 4, 5]. Когда потери выделяются в нескольких контурах, частотная характеристика эквивалентирующего активного сопротивления должна с некоторым приближением отражать нагрев того из контуров, в котором выделяется наибольшая часть полных потерь. Поэтому для роторов 1 и 2 частотные характеристики должны отражать нагрев полюсного наконечника в соответствующих интервалах частот.

Таблица 2

Частота, гц		10	25	50	150	200	250	300	350	400
Ротор 1	η_n при $I_c = 610$, С	$\frac{6,0}{6,8}$	$\frac{6,4}{7,2}$	$\frac{7,0}{7,5}$	$\frac{10,4}{9,7}$	$\frac{12,3}{11,7}$	$\frac{14,0}{13,6}$	$\frac{16}{15,1}$	$\frac{17,8}{17,5}$	—
	η_n при $I_c = 600$, С	$\frac{4,7}{4,1}$	$\frac{6,0}{5,5}$	$\frac{8,1}{7,8}$	$\frac{16,3}{16,7}$	$\frac{20,3}{21,3}$	$\frac{24,5}{26,8}$	—	—	—
Ротор 2	η_n при $I_c = 450$, С	—	—	—	$\frac{8,2}{8,2}$	$\frac{10,4}{10,5}$	$\frac{12,9}{13,1}$	$\frac{15,7}{16,2}$	$\frac{18,7}{19,2}$	$\frac{22,3}{22,5}$

В табл. 2 приведены превышения температуры наконечника, полученные по опытным данным (числитель) и по следующей формуле (знаменатель)

$$\theta_{af} = \Gamma_{pf} \frac{S_{af}}{r_{pf}} \quad (4)$$

где

ϵ_{pm} и ϵ_{pf} — превышение температуры полюсного наконечника и активное сопротивление ротора при частоте, равной 100 гц; ϵ_{pf} и ϵ_{pf} — то же, но при частоте f .

Полученную точность определения ϵ_0 по (4) можно считать приемлемой. Причем, как это видно из табл. 2, удовлетворительные данные получаются и при частотах ниже 50 гц и выше 250 гц.

В результате проведенного исследования можно отметить, что в диапазоне частот 10 ÷ 450 гц большая часть потерь роторов с успокоительной обмоткой выделяется в этой обмотке; для роторов с успокоительной обмоткой теплотем с наконечника значительно лучше, чем с катушки возбуждения. Поэтому отношение превышений температуры наконечника и катушки возбуждения значительно меньше, чем отношение потерь в них. Для изученной машины в диапазоне частот 10 ÷ 350 гц отношение превышений температуры находится в пределах 4 ÷ 2, отношение потерь — в пределах 20 ÷ 5. С возрастанием частоты от 10 до 340 гц доля потерь, выделяющихся в наконечниках ротора с полной успокоительной обмоткой, убывает соответственно с 96% до 86%. С возрастанием частоты от 10 до 450 гц доля потерь, выделяющихся в наконечниках ротора с неполной успокоительной обмоткой, убывает с 93% до 85%. За счет этого возрастает доля потерь в обмотке возбуждения. Перераспределение потерь в полюсе в сторону увеличения доли потерь в обмотке возбуждения весьма нежелательно, так как ухудшается тепловой режим обмотки возбуждения. При отсутствии успокоительной обмотки потери в полюсе распределяются между наконечником и катушкой приблизительно поровну. Такое распределение сохраняется с возрастанием частоты.

Для синхронных машин небольшой и средней мощности по частотной характеристике активного сопротивления ротора, имеющего мощную успокоительную обмотку ($m = 0,226$), зная ϵ_0 при частоте, равной 100 гц, можно определять ϵ_0 в диапазоне частот 10 ÷ 400 гц.

Автор выражает глубокую благодарность В. В. Алексеевскому за ценные замечания, учтенные в статье.

Ереванский политехнический институт
им. К. Маркса

Получено 24.VI.1966.

В. Ф. АЛЕКСЕЕВ

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԲԱՆԻՈՒԹՅԱՆ ԻՆՏԵՐՆԱԿԱՆ ՏԵԽՆԻԿԵՍԿԱՅԻՆ
ՄԱԳԻՍՏՐԱՏՈՒՅԻՆ ՀԱՅԱՍՏԱՆԻՑԻ

Ա. Վ. Փ. Ն. Ր. Ն. Ր.

Հրիվ և ոչ հրիվ հանդուստանող պղնձե փափուկված բաղաձայն բեկեներով
ստորի և առանց հանդուստանող փափուկված ստորի տարածման հարձակում
ալյարները հիման վրա որոշվում է բեկումին ծալրապատեակի և գրգռման

կոմի պաղեցման էֆեկտիվությունը, ինչպես նաև կորուստների բաշխումը նրանց միջև 10—400 հզ. չափախոյան ինտերվալում:

Շանգստացնող փաթույթ ունեցող ռոտորների կորուստների ամենամեծ մասն առաջանում է շանգստացնող փաթույթում: Այս նախաձեռնությունը թույլ է տալիս ռոտորի կոնտուրների չափերների նախատես աղբյուրների դեպքում արդեն բնական ծալրապահակի վերմոխյան մեծացումը, սզսվելով ռոտորի ակտիվ դիմադրությամբ չափափականային բնութագրից:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Назарк Н. Г. О применении принципа наложения при тепловых эксплуатационных испытаниях и тепловых расчетах электрических машин и трансформаторов Труды АЭИ, № 1, 7, 1946.
2. Назарк Н. Г. Влияние насыщения на нагрев выполощенного ротора с медной успокоительной обмоткой Труды ЕРЭИ, 1967.
3. Барсегян Н. С. Активное сопротивление статора выполощенной синхронной машины токам высших гармоник. Изв. АН Арм.ССР, серия техн. наук : XVIII, № 4, 1965.
4. Барсегян Н. С. Активное сопротивление контуров выполощенного ротора токам высших гармоник. Изв. ЕРЭИ, 1966.
5. Тер-Газарян Г. Н. Нагрев ротора гидрогенератора, обусловленный дополнительными потерями. «Электричество», № 8, 1963.