

ВЛИЯНИЕ ДЕМПФЕРА НА НАГРЕВ КОНЦЕВЫХ ЧАСТЕЙ РОТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА В АНОМАЛЬНЫХ РЕЖИМАХ

В. К. Иванов, В. Д. Климовицкий, В. Ф. Чириков

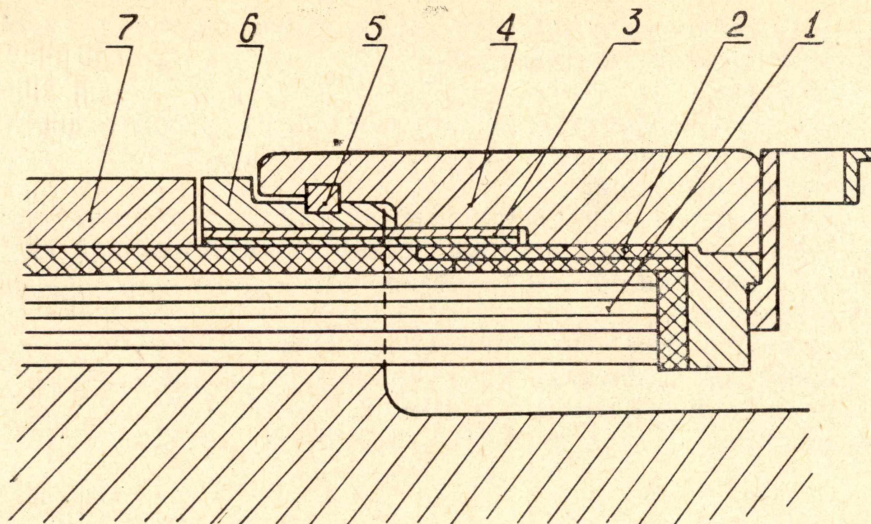
(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин
и общей электротехники)

При аномальных режимах работы турбогенератора токи, индуктируемые в бочке ротора, замыкаются на ее торцах. Проходя через концевые клинья, зубцы и бандажное кольцо в месте посадки на бочку ротора, токи вызывают нагрев торцевой зоны. С ростом единичной мощности турбогенераторов, который сопровождается увеличением линейных нагрузок, интенсивность потерь в торцевой зоне возрастает, что вынуждает уменьшать допустимую продолжительность работы турбогенератора в аномальных режимах. Например, для турбогенераторов серии Т2, мощностью до 60 Мвт, величина $I_2^2 t$, характеризующая потери, выделяющиеся в роторе под воздействием тока обратной последовательности I_2 за время t , ограничена 30; для турбогенераторов ТВФ-100, мощностью 100 Мвт, эта величина снижена до 15, а для турбогенераторов серий ТВВ и ТГВ мощностью 150—300 Мвт — до 8. Значительное улучшение теплового состояния торцевой зоны может быть достигнуто при установке на роторе специальной демпферной системы, разгружающей торцевую зону от поперечных токов. Аналогичные системы в свое время не нашли широкого применения в турбогенераторах, так как их достаточная надежность в механическом отношении не обеспечивалась конструкцией бандажного узла в целом.

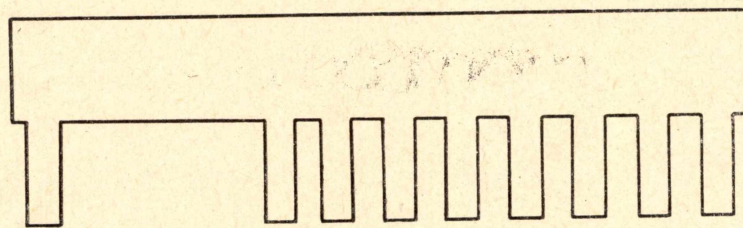
В СибНИЭТИ был проработан вариант выполнения демпферной системы применительно к турбогенераторам большой мощности, надежности которого способствует непосредственное крепление бандажа только на бочку ротора, и проведена его проверка на турбогенераторе типа Т2-0,75-2БП (мощность 750 квт, напряжение 400 в, ток 1355 а, скорость 3000 об/мин).

Для испытаний ротор генератора был реконструирован. Отставленные бандажи из магнитной стали были заменены немагнитными с конусообразной посадкой на бочку ротора (рис. 1, а). Взамен пазовых клиньев, составных по ширине, были установлены сплошные клинья: в средней части — из дуралюминия, в концевых частях — из немагнитной стали. Для возможности оценки эффективности демпферной системы последняя была размещена только на стороне контактных колец. Демпфер выполнен из двух слоев медных сегментов (рис. 1, б) гребенчатой формы толщиной 1,5 мм, установленных вперекрой. Зубцы сегментов заведены под концевые пазовые клинья. Подгонкой концевых клиньев обеспечен хороший электрический контакт с зубцами сегмента.

Для регистрации нагревов отдельных элементов ротора последний был оснащен системой медь-константовых термопар. Термопары были



а)



б)

Рис. 1. Бандажный узел с демпфером.

а) общая компоновка: 1 — обмотка возбуждения, 2 — подбандажная изоляция, 3 — сегмент демпфера, 4 — бандажное кольцо, 5 — шпонка, 6 — клин из немагнитной стали, 7 — клин дуралюминиевый;
б) сегмент демпфера

установлены на поверхности элементов ротора вдоль трех образующих: на большом зубе, примерно в 50 мм от его края; на малом зубе, равноотстоящем от больших зубьев ротора; на клиньях, прилегающих к этому малому зубцу. При этом термомпары делились на 5 зон: в 13÷15 мм от торца (посадочные поверхности), в 62÷65 мм от торца, в 300 мм от торца (середина бочки). Кроме того, с обеих сторон были установлены на расстоянии 14÷20 мм от торца термомпары в «теле» бочки (на стенках вентиляционного канала в большом зубе) и концевой клина на глубине 6÷8 мм от посадочных поверхностей, а также на посадочных поверхностях бандажей (над вентиляционными каналами в большом зубе). Головки всех термомпар имели хороший тепловой контакт с контролируемыми элементами за счет припайки или зачеканки, за исключением термомпар на бандаже, которые приклеивались. Трассы всех термомпар через специальные радиальные сверления и центральное отверстие были выведены на токосъемник системы ВНИИЭМ.

Регистрация термоэдс в длительных режимах производилась с помощью потенциометра, в нестационарных — с использованием шлейфного осциллографа.

Возможные в эксплуатации аномальные режимы, сопровождающие-

ся значительным тепловыделением в конструктивных элементах ротора, можно свести, в основном, к трем типам:

- 1) асинхронные;
- 2) длительные несимметричные, обусловленные несимметрией нагрузки, при которых величина статорных токов обратной последовательности относительно невелика;
- 3) кратковременные несимметричные, вызванные несимметричными короткими замыканиями или неисправностью коммутационной аппаратуры, в этом случае токи обратной последовательности могут достигать значительной величины.

В соответствии с этим испытания проводились в режимах трех типов: асинхронных, обратно-синхронного вращения, двухфазного короткого замыкания. В дальнейшем рассмотрении, в основном, используются результаты режимов, электрические параметры которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

№ п.п.	Наименование режима	U в	I а	s о.е.	P _s квт	I ₂ о.е.	Характер режима
1	Асинхронный	169	1598	0,0292	7,5	—	Длительный
2	Обратно-синхронного вращения	16,7	500	2,04	8,6	0,37	Длительный
3	2-фазного короткого замыкания	—	3600	—	—	1,56	Кратковременный

Уровень потерь, выделяемых в роторе (P_s), в режимах 1 и 2 близок к потерям в обмотке ротора при номинальном токе P_{вн}=8,6 квт.

В табл. 2—4 представлены дополнительные нагревы (сверх нагревов в вентиляционном тепловом режиме) в характерных точках измерения во всех 3 режимах. Их сопоставление для торцов с демпфером и без него совершенно четко показывает, что в исследуемой конструкции демпфер эффективен при наличии токов обратной последовательности, в асинхронном режиме его влияния практически не сказывается.

Таблица 2

Дополнительные нагревы посадочных поверхностей в режиме асинхронного хода (°С)

Точки измерения	Сторона без демпфера	Сторона с демпфером
Большой зуб	38,5	38,5
Малый зуб	27,6	24,4
Клин	25,9	22,7
Бандажи	20,7	20,5

Таблица 3

Дополнительные нагревы посадочных поверхностей в режиме обратно-синхронного вращения, (°С)

Точки измерения	Сторона без демпфера	Сторона с демпфером
Большой зуб	48,4	22,6
Малый зуб	31,4	13,2
Клин	50,7	16,7
Бандажи	28,7	15,5

Дополнительные нагревы посадочных поверхностей в нестационарном режиме двухфазного короткого замыкания при $I_2 t = 25$ ($^{\circ}\text{C}$)

Точки измерения	Страна без демпфера	Страна с демпфером
Большой зуб	280	120
Малый зуб	28	6
Клин	111	16
Бандажи	12	5

Полученные результаты позволяют более подробно остановиться на каждом режиме.

Распределение нагревов в асинхронном режиме достаточно равномерное (рис. 2, а), местной концентрации у торцов не наблюдается. Если отнести подъем нагревов в средней части большого зуба за счет худшего охлаждения этой части ротора, что характерно для симметричной радиальной системы вентиляции, то можно говорить о практически рав-

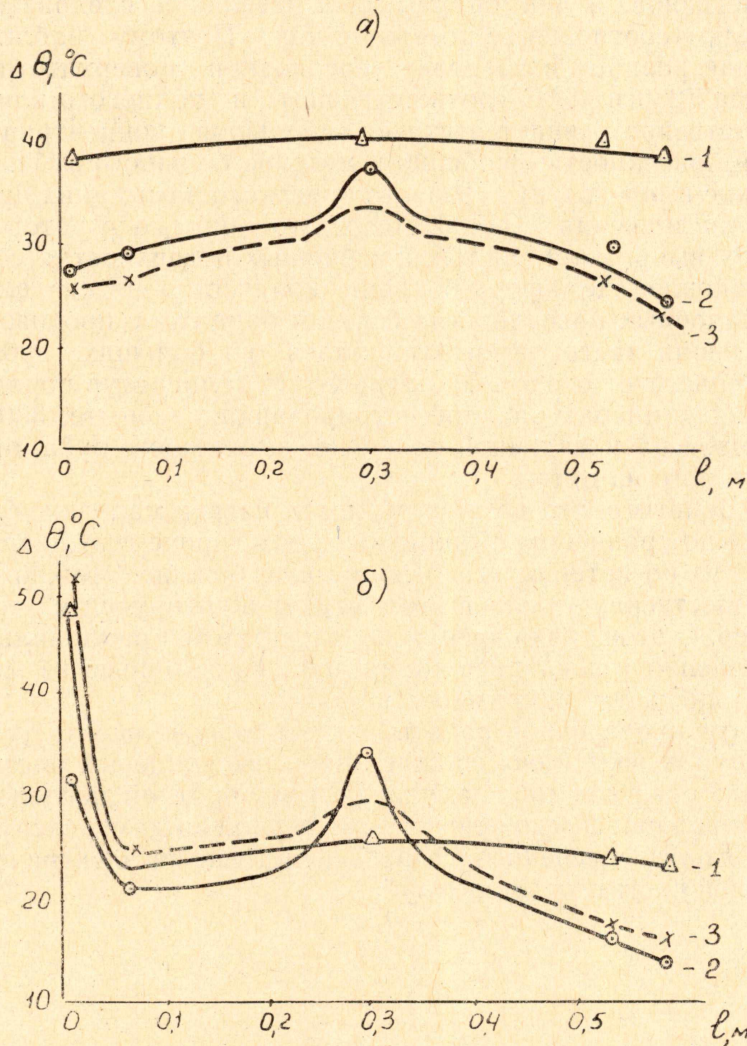


Рис. 2. Распределение дополнительного нагрева по длине ротора: 1 — большой зуб, 2 — малый зуб, 3 — клин; а) режим асинхронного хода, б) режим обратнo-синхронного вращения

номерном по длине выделении потерь. В то же время заметна разница в нагреве большого зуба и малого зуба с прилегающими к нему клиньями.

Имеющееся количество термодатчиков позволяет, к сожалению, лишь предположительно говорить о деталях распределения нагревов по длине ротора в режиме обратно-синхронного вращения. Наблюдается резкая концентрация нагревов у торца на стороне без демпфера (рис. 2, б), тогда как с противоположной стороны распределение нагревов равномерно, а уровень их в 2—2,5 раза ниже. Разгружающее действие демпфера на клин и малый зуб заметно больше, чем на большой зуб, поскольку последний не имеет непосредственного электрического контакта с сегментами демпфера. Большое увеличение температуры малого зуба по середине ротора следует отнести за счет стыка клиньев в этом месте, приводящего к перераспределению токов между зубцами и клиньями.

В нестационарном режиме двухфазного короткого замыкания влияние демпфера на различные элементы ротора проявляется еще более дифференцированно: уровень нагрева снижается для большого зуба и бандажа более чем в 2 раза, для малого зуба — примерно в 4,5 раза, для клина — примерно в 7 раз (табл. 4). Характер кривых нагрева показывает, что к моменту времени, когда $I_2^2 \cdot t$ достигло 25, теплообмен областей, прилегающих к термодарам, был невелик и, следовательно, нагревы отражают соотношение потерь в них. Поэтому наблюдаемая в опыте большая разница в нагревах посадочной поверхности и «тела» большого зуба (280 и 46° С соответственно) и концевой клина (111 и 45° С соответственно) свидетельствует о большой концентрации потерь у посадочной поверхности, особенно в массиве большого зуба.

Испытание в режиме двухфазного короткого замыкания при $I_2=1,56$ проводилось до значения $I_2^2 t=60$. Последующий осмотр ротора при снятых бандажах выявил при чистых посадочных поверхностях со стороны, где был установлен демпфер, большое количество пятен темно-синего цвета на посадочных поверхностях бочки и бандажа с противоположной стороны. Большая часть пятен находилась на больших зубцах. Цвет пятен свидетельствует о местных нагревах до температур порядка 350° С. Максимальная температура зарегистрированная в опыте, 330° С, показана термодарой на посадочной поверхности большого зуба, оказавшейся в центре одного из пятен.

Следует отметить, что во всех режимах нагрев малого зуба в целом заметно ниже по сравнению с большим зубом, причем последний режим показывает, что по потерям эта разница еще больше. Можно предположить, что существенную роль в этом играет шунтирующее действие пазовых клиньев. С этой точки зрения подтверждается рациональность широкого применения в последнее время концевых клиньев из материалов высокой проводимости, например из бронзы.

Результаты проведенной работы показывают, что исследуемая демпферная система эффективно снижает нагревы концевых частей ротора в аномальных режимах при наличии токов обратной последовательности. Для увеличения эффективности демпферной системы следует выполнять ее так, чтобы обеспечивался непосредственный электрический контакт с торцевой частью большого зуба.