

УДК 621.313

М. А. Ваганов, К. А. Колупицкий

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Проектирование ротора турбогенератора с оптимальной поперечной геометрией статора

Уточняется математическая модель турбогенератора в статическом режиме работы; на ее базе определяются оптимальные значения магнитной индукции в воздушном зазоре и относительного диаметра расточки статора, обеспечивающие наилучшее использование активных материалов машины относительно ее электромагнитного момента. Приведены результаты сравнения числовых значений параметров статоров, спроектированных и находящихся в эксплуатации турбогенераторов с оптимальными числовыми значениями этих же параметров, но рассчитанных на базе разработанной математической модели, сделаны соответствующие выводы. Рассмотрен порядок проектирования ротора турбогенератора для статора с оптимальной поперечной геометрией. Затронуты вопросы конструкции ротора турбогенератора в целом. Выполнены оценка результатов расчета параметров роторов турбогенераторов с оптимальной поперечной геометрией статоров и сопоставление данных величин с таковыми для роторов турбогенераторов, спроектированных и находящихся в эксплуатации.

Магнитная индукция в воздушном зазоре, магнитная индукция в спинке сердечника статора, магнитная индукция в спинке вала ротора, магнитная индукция в зубцах сердечника статора, магнитная индукция в зубцах вала ротора, относительный диаметр расточки статора, относительная длина пакета стали статора, наружный диаметр пакета стали статора, высота пазов статора и ротора

Принципиальной особенностью синхронных машин как электромеханических преобразователей энергии является то, что указанное преобразование энергии происходит только в статоре, но при участии магнитного поля, созданного ротором, через который подведенная к нему со стороны вала механическая энергия за вычетом ее части, обусловленной механическими потерями, передается в виде электромагнитной энергии вращающимся магнитным полем через воздушный зазор от ротора к статору и воспринимается его обмоткой. Данная особенность в равной мере относится и к турбогенераторам. По этой причине оптимизация поперечной геометрии распространяется только на статор турбогенератора как на его силовой элемент. При этом условии ротор должен обязательно вписываться в объем оптимальной расточки статора. Решению этой задачи посвящена предлагаемая авторами статья.

В [1] представлена разработанная математическая модель турбогенератора, позволяющая определить значения магнитной индукции в воздушном зазоре B_δ и относительного диаметра расточки статора D_{1*} , оптимальные с точки зрения наилучшего использования материалов в объеме активного ядра машины относительно электромагнитного момента. Это значит, что предложенная модель позволяет однозначно, т. е. практически без вариантов, рассчитать необходимые для проектирования статора турбогенератора его обмоточные данные, гарантированно обеспечив при этом оптимальность турбогенератора по уровню использования его активных материалов. В [2] была проведена оценка влияния различных параметров турбогенератора на оптимальные значения магнитной индукции в воздушном зазоре и относительного диаметра расточки статора и сделаны соответствующие выводы, в целом подтвержда-

ющие правильность выбора направления проектирования турбогенераторов.

В полученное в [1] выражение для коэффициента k_F введем уточняющие поправки. Действующее значение фазной ЭДС самоиндукции E_1 обмотки статора и напряжение U_1 связаны между собой соотношением $\frac{E_1}{U_1} = k_B$, где $k_B = 1.09 \dots 1.17$ – коэффициент возбуждения. При этом дополнительно воспользуемся известным соотношением, связывающим линейное U_L и фазное U_ϕ напряжения обмотки статора, согласно которому $U_L = \sqrt{3}U_\phi$. Тогда, при учете вышеизложенного, математическое выражение для коэффициента k_F примет следующий вид:

$$k_F = \frac{3\pi f_1 k_{об1}^2 \gamma_1}{4k_{\theta 1} k_B^2} k_{r1}.$$

Кроме того, в знаменатель выражения, определяющего активное сопротивление фазы обмотки статора турбогенератора r_1 из [1], необходимо добавить множитель a_1 – число параллельных ветвей обмотки статора, и тогда оно примет следующий вид: $r_1 = \frac{2W_1(l_1 + l_{лoб1})k_{\theta 1}}{\gamma_1 q_{a1} a_1}$, а общая площадь всех пазов статора [1] будет определяться выражением $Q_{п1} = \frac{2m_1 W_1 q_{a1} a_1}{k_{r1}}$.

$$h_{п1} = \frac{D_1}{2} \left\{ \sqrt{\left(\frac{1}{D_1^*} - \frac{B_\delta}{pk_{c1} B_{c1}} \frac{l_1}{l_{c1}} \right)^2} - \sin^2 \left[\frac{\pi}{z_1} - \arcsin \left(\frac{\pi}{z_1 k_{c1}} \frac{B_\delta}{B_{31}} \frac{l_1}{l_{c1}} \right) \right] - \cos \left[\frac{\pi}{z_1} - \arcsin \left(\frac{\pi}{z_1 k_{c1}} \frac{B_\delta}{B_{31}} \frac{l_1}{l_{c1}} \right) \right] \right\};$$

$$k_{п1} = \frac{z_1}{2} \sin \left[\frac{\pi}{z_1} - \arcsin \left(\frac{\pi}{z_1 k_{c1}} \frac{B_\delta}{B_{31}} \frac{l_1}{l_{c1}} \right) \right] \times$$

$$\times \left\{ \sqrt{\left(\frac{1}{D_1^*} - \frac{B_\delta}{pk_{c1} B_{c1}} \frac{l_1}{l_{c1}} \right)^2} - \sin^2 \left[\frac{\pi}{z_1} - \arcsin \left(\frac{\pi}{z_1 k_{c1}} \frac{B_\delta}{B_{31}} \frac{l_1}{l_{c1}} \right) \right] - \cos \left[\frac{\pi}{z_1} - \arcsin \left(\frac{\pi}{z_1 k_{c1}} \frac{B_\delta}{B_{31}} \frac{l_1}{l_{c1}} \right) \right] \right\}.$$

Следующее уточнение касается определения магнитных потоков в зубце Φ_{31} и спинке Φ_{c1} сердечника статора. Согласно [1] математические выражения, определяющие данные величины, имеют в своей структуре множитель l_1 – полную аксиальную длину сердечника статора. Однако конструктивную особенность статоров турбогенераторов, обусловленную необходимостью обеспечения требуемых уровня охлаждения и схемы

вентиляции, представляет наличие воздушных промежутков между пакетами сердечника статора с аксиально расположенными перегородками. Таким образом, при определении площадей поперечных сечений зубца и спинки сердечника статора, а также магнитных потоков в этих элементах сердечника статора необходимо учитывать наличие и суммарное значение воздушных промежутков между пакетами. Введем дополнительное обозначение l_{c1} , представляющее собой аксиальную длину сердечника статора без вентиляционных каналов, и тогда минимальную ширину зубца сердечника статора b_{31} [1] необходимо определять следующим образом: $b_{31} = \frac{\pi D_1}{z_1 k_{c1}} \times$

$\times \frac{B_\delta}{B_{31}} \frac{l_1}{l_{c1}}$, а минимальная высота спинки сердечника статора h_{c1} [1] будет определяться выражением $h_{c1} = \frac{D_1 B_\delta}{2pk_{c1} B_{c1}} \frac{l_1}{l_{c1}}$. Математические выражения для определения ширины $b_{п1}$ и высоты паза сердечника статора $h_{п1}$, а также коэффициента $k_{п1}$ [1] с учетом введения l_{c1} будут иметь следующий вид:

$$b_{п1} = D_1 \sin \left[\frac{\pi}{z_1} - \arcsin \left(\frac{\pi}{z_1 k_{c1}} \frac{B_\delta}{B_{31}} \frac{l_1}{l_{c1}} \right) \right];$$

Анализ конструкций статоров спроектированных и находящихся в промышленной эксплуатации турбогенераторов позволяет сделать ряд выводов, касающихся отношения l_1/l_{c1} . Численное значение данной величины зависит главным образом от типа охлаждающего газа, который перемещается в процессе работы турбогенератора согласно схеме вентиляции по организованным для этого в сердечнике статора вентиляционным каналам, а также от типа системы охлаждения

машины и колеблется в достаточно узких пределах. Зависимость значения отношения l_1/l_{c1} от мощности машины практически не прослеживается. Если же иметь в виду конкретные значения данной величины, то следует отметить, что для турбогенераторов с воздушным охлаждением сердечника статора $l_1/l_{c1} = 1.18...1.20$, а для турбогенераторов с его водородным охлаждением $l_1/l_{c1} = 1.100...1.125$. Приведенные значения свидетельствуют о том, что турбогенераторы с косвенным воздушным охлаждением – более напряженные в тепловом отношении, чем генераторы с непосредственным водородным охлаждением, и требуют обеспечения в конструкции сердечника статора большего количества радиальных вентиляционных каналов, а значит, меньшей ширины одного пакета, чем турбогенераторы с водородным охлаждением, имеющие точно такую же полную аксиальную длину сердечника статора l_1 .

Для подтверждения корректности разработанной в [1] и уточненной в данной статье математической модели оптимальной поперечной геометрии турбогенератора при ее непосредственном использовании был выполнен расчет значений магнитной индукции в воздушном зазоре $B_{\delta m}$, относительного диаметра расточки статора D_{1*m} , наружного диаметра сердечника статора D_{1nm} , ширины $b_{п1m}$ и высоты $h_{п1m}$ паза сердечника статора, а также высоты его спинки h_{c1m} , обеспечивающих наилучшее использование активных материалов относительно электромагнитного момента, для 12 находящихся в эксплуатации турбогенераторов, отличающихся друг от друга мощностями, конструкциями, системами и типами охлаждения и числами полюсов. Добавление индекса m к обозначениям вышеперечисленных параметров обусловлено тем, что они характеризуют максимальное значение функции F_{M*m} , определяющей оптимальную по использованию материалов в объеме активного ядра машины поперечную геометрию турбогенератора относительно электромагнитного момента. При выполнении расчетов по разработанной модели значения необходимых параметров, входящих в нее, рассчитывались исходя из фактической поперечной геометрии и конструкции рассматриваемых генераторов. К таким параметрам относятся:

относительная аксиальная длина сердечника статора l_* , число пазов сердечника статора z_1 , магнитные индукции в спинке B_{c1} и в зубцах B_{z1} сердечника статора, обмоточный коэффициент статора $k_{об1}$, коэффициент заполнения паза сердечника статора голым проводом k_{r1} , электрические сопротивления r_1 и x_d , а также угол нагрузки θ . Для наглядности результаты расчета оптимальных параметров и промежуточные значения приведены в табл. 1. Кроме того, в данной таблице представлены полученные значения МДС на воздушный зазор F_{δ} , МДС в спинке статора F_{c1} и МДС в зубцах сердечника статора F_{z1} . Значения параметров без индекса m в табл. 1 соответствуют фактическим значениям данных величин в реальных машинах; ТГ означает турбогенератор.

Из таблицы видно, что значения $B_{\delta m}$ во всех случаях в среднем на 10–15 % оказались ниже значений B_{δ} и в большей степени укладываются в интервалы, рекомендуемые в [3], значений магнитной индукции в воздушном зазоре турбогенератора. Значения D_{1*m} также оказались меньше значений D_{1*} в среднем на 10 %. При этом можно отметить достаточно удовлетворительное совпадение значений D_{1nm} и $D_{1н}$. То же самое можно сказать о $b_{п1m}$ и $b_{п1}$. Однако размеры участков магнитной цепи сердечников статоров рассматриваемых генераторов в радиальном направлении $h_{п1m}$ и h_{c1m} , рассчитанные с применением разработанной модели, достаточно сильно разнятся с фактическими значениями $h_{п1}$ и h_{c1} . Это обусловлено необходимостью искусственного увеличения высоты спинки сердечника статора с целью обеспечения необходимой жесткости сердечника статора, снижения амплитуды радиальных колебаний сердечника и достаточной отстройки собственной частоты его колебаний.

Из-за разницы в значениях D_{1*m} и D_{1*} и практического равенства величин D_{1nm} и $D_{1н}$ абсолютные значения диаметров расточек статоров D_{1m} , обеспечивающих оптимальность поперечной геометрии статора, которые можно рассчитать по формуле: $D_{1m} = D_{1*m} D_{1nm}$, оказываются также меньше значений диаметров расточек

Параметр ТГ	Номер турбогенератора											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
p	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
z_1	48	72	48	60	60	54	48	42	42	72	60	48
l_* , о. е.	1.53	1.02	1.43	1.07	1.62	2.26	2.31	2.36	2.36	1.67	1.96	2.27
l_1/l_{c1} , о. е.	1.184	1.194	1.198	1.190	1.125	1.123	1.126	1.120	1.120	1.115	1.099	1.100
B_{c1} , Тл	1.50	1.57	1.25	1.46	1.48	1.50	1.52	1.53	1.53	1.49	1.43	1.52
B_{31} , Тл	1.83	2.02	1.86	1.92	1.94	1.88	1.86	1.99	1.99	1.79	2.05	2.02
D_{1*} , о. е.	0.497	0.492	0.427	0.48	0.486	0.489	0.493	0.475	0.475	0.633	0.601	0.631
D_{1*m} , о. е.	0.446	0.433	0.420	0.431	0.438	0.449	0.452	0.445	0.445	0.544	0.526	0.536
B_{δ} , Тл	0.81	0.90	0.90	0.89	0.92	0.89	0.91	1.05	1.05	0.94	1.10	1.10
$B_{\delta m}$, Тл	0.757	0.828	0.724	0.785	0.827	0.801	0.795	0.843	0.844	0.884	0.994	0.992
$k_{об1}$	0.923	0.911	0.905	0.923	0.923	0.915	0.923	0.913	0.913	0.924	0.910	0.925
k_{01}	1.4	1.4	1.4	1.4	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22
k_B	1.09	1.09	1.08	1.12	1.12	1.11	1.16	1.11	1.16	1.17	1.17	1.14
k_{r1}	0.401	0.437	0.378	0.521	0.281	0.279	0.322	0.263	0.263	0.367	0.282	0.370
θ, \dots°	36.8	26.5	23.5	27.1	32.0	28.5	34.3	32.7	39.6	29.6	30.8	25.8
$k_F \cdot 10^9$, См/м·с	1.38	1.46	1.53	1.69	1.05	1.05	1.12	0.98	0.90	1.26	0.94	1.34
x_{d*} , о. е.	1077	1164	1298	1368	1050	1049	1220	957	943	715	657	523
$F_{M\theta} \cdot 10^{-4}$, Тл ²	6.06	4.18	3.32	3.74	5.66	5.05	5.37	6.27	7.85	8.10	9.11	9.50
F_{M*m} , Тл ²	0.0098	0.0061	0.0073	0.0059	0.0123	0.0190	0.0196	0.0220	0.0220	0.0137	0.0200	0.0246
$h_{п1}$, мм	155	192	230	204	203	225	221	222	222	209	226	181
$h_{п1m}$, мм	242.5	333.8	328.7	367.0	346.7	350.1	363.6	388.8	395.1	399.1	436.4	398.4
$b_{п1}$, мм	26.4	22.8	27	27.5	28.4	33	37.3	41	41	33.6	40.3	52.6
$b_{п1m}$, мм	25.1	21.7	33.6	28.8	28.9	33.9	39.7	48.6	49.4	30.5	40.5	46.9
h_{c1} , мм	285	408	460	458.5	439.5	437.5	456.5	553	553	356	429	429
h_{c1m} , мм	238.2	325.9	353.1	363.6	353.5	357.3	367.5	403.0	410.9	275.7	338.5	298.4
$D_{1н}$, мм	1750	2360	2410	2550	2500	2590	2670	2950	2950	3080	3280	3310
$D_{1нm}$, мм	1735	2326	2351	2567	2494	2568	2670	2855	2906	2962	3272	3005
F_{c1} , А	321	526	270	446	453	488	518	547	557	262	253	287
$F_{31} \cdot 10^5$, А	0.082	0.387	0.192	0.283	0.241	0.144	0.158	0.700	0.608	0.507	1.506	2.151
$F_{\delta} \cdot 10^4$, А	1.886	3.519	3.159	4.336	4.889	6.376	6.393	7.162	7.180	5.593	7.146	7.974

статоров D_1 анализируемых турбогенераторов в среднем на те же 10 %, что влечет за собой соответствующее уменьшение наружного диаметра ротора $D_{2н}$.

Теперь необходимо оценить возможность вписать в фиксированный объем расточки статора ротор, который смог бы обеспечить оптимальное значение магнитной индукции $B_{\delta m}$ в воздушном зазоре турбогенератора, полученное на этапе его оптимизации.

Оценим возможность проектирования и создания роторов с уменьшенным наружным диаметром, соответствующих представленным в табл. 1 оптимальным параметрам статоров.

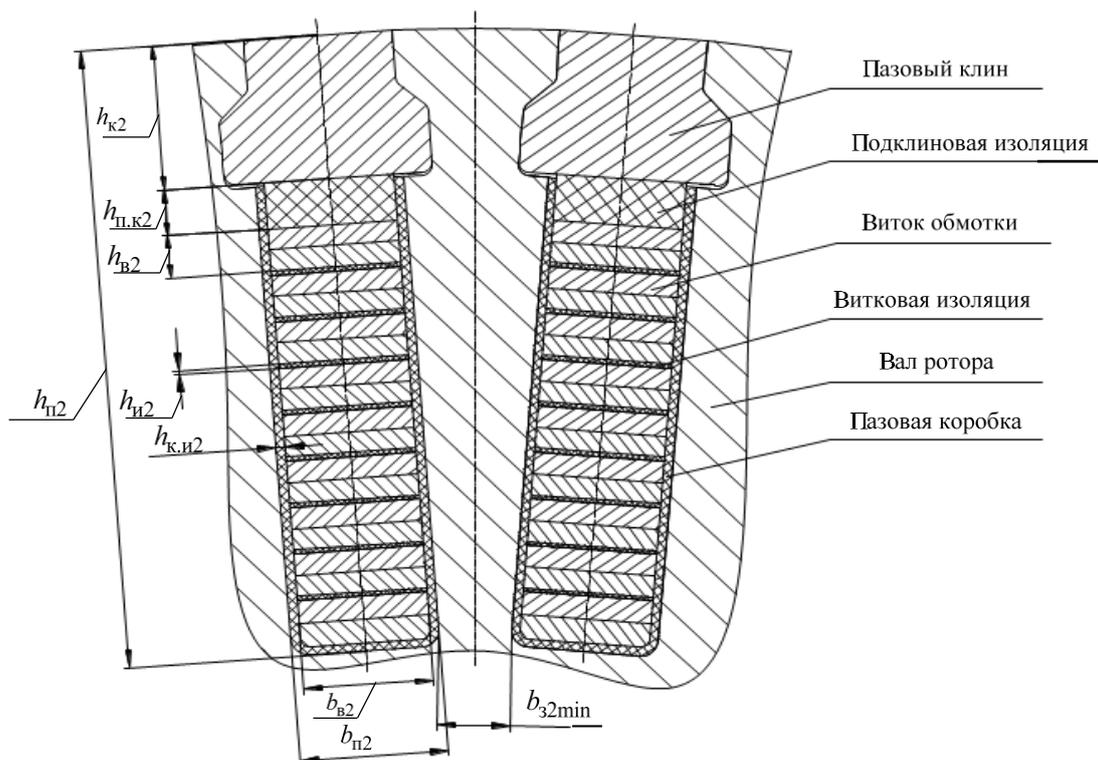
Для решения этой задачи необходимо прежде всего выбрать радиальную длину воздушного зазора δ между расточкой статора и цилиндрической поверхностью ротора, значение которого определяется, главным образом, из условия получения заданного отношения короткого замыкания (ОКЗ) или статической перегружаемости турбогенератора [3].

В технической литературе существуют графические зависимости размера воздушного зазора от диаметра расточки статора для турбогенераторов различных типов. Немалую роль в выборе значения воздушного зазора также играет система и тип охлаждения машины. Так, в случае непо-

средственного водородного охлаждения ротора воздушный зазор несколько больше, чем в случае воздушного или водяного охлаждения. Это обусловлено необходимостью выступления заборников пазовых клиньев ротора в воздушный зазор для обеспечения поступления «холодного» водорода в вентиляционные каналы обмотки ротора и выброса «горячего» водорода в зазор. При выборе значения зазора необходимо также учитывать, что конструкция ротора всегда предполагает наличие бандажных колец, удерживающих лобовые части обмотки ротора от радиальных и осевых перемещений, которые устанавливаются на торцы бочки вала ротора и в любом случае имеют больший наружный диаметр, чем наружный диаметр вала ротора (более подробное описание возможных конструктивных исполнений бандажных узлов роторов турбогенераторов представлено в [4]). Радиальный зазор между расточкой статора и бандажным кольцом ротора должен быть достаточным для исключения механических повреждений пакетов сердечника статора и бандажных колец ротора. В результате оказывается, что при выборе значения воздушного зазора необходимо учитывать целый ряд противоречивых факторов. Так, например, для повышения устойчивости параллельной работы синхронных генераторов (а это в большинстве случаев – их определяющий режим работы) требуется повышать ОКЗ за счет снижения синхронного индуктивного сопротив-

ления обмотки статора по продольной оси x_d , значение которого обратно пропорционально значению воздушного зазора δ , но это будет иметь своим следствием возрастание числа витков обмотки возбуждения в условиях ограниченности места для их размещения.

После выбора длины воздушного зазора можно перейти непосредственно к расчету зубцовой зоны сердечника ротора и обмотки ротора. Сердечник ротора в турбогенераторах – это вал ротора, который изготавливается из цельной стальной поковки. Составными элементами вала являются: бочка вала, две полубочки и два хвостовика. Бочка вала ротора – активная часть сердечника ротора, представляет собой среднюю часть вала с наибольшим диаметром, в которой фрезеруются пазы для укладки обмотки возбуждения. В современных конструкциях турбогенераторов роторные обмоточные пазы имеют трапециевидальную, прямоугольную или ступенчатую формы. Стандартное наполнение пазов вала ротора турбогенератора представлено на рисунке. Здесь показан паз прямоугольного сечения, имеющий высоту $h_{п2}$ и ширину $b_{п2}$. Перед началом укладки в эти пазы устанавливаются пазовые изоляционные коробки, служащие корпусной изоляцией обмотки ротора. Их толщина $h_{к.и2}$, как правило, составляет 1.5...2 мм – в зависимости от напряжения возбуждения. Затем укладываются витки обмотки



с витковой изоляцией. Виток обмотки ротора имеет толщину $h_{в2}$ и ширину $b_{в2}$, и в зависимости от силы тока возбуждения может состоять из 1–4 элементарных проводников. Между витками устанавливается витковая изоляция в виде прокладок, толщина которых $h_{и2}$ также определяется рабочим напряжением ротора и составляет от 0.5 до 1 мм. От радиальных перемещений в пазу обмотка ротора удерживается металлическим клином, устанавливаемым в специальные пазы типа «ласточкин хвост», которые фрезеруются в бочке ротора. Высота клиновой части паза вала ротора $h_{к2}$ определяется в ходе расчета пазового клина ротора на механическую прочность и, как правило, составляет от 25 до 35 мм. Для исключения электрического пробоя между верхним витком обмотки ротора и пазовым клином устанавливается изоляционная прокладка из слоистых материалов толщиной $h_{п.к2}$, при помощи ее пригонки по толщине, также обеспечивается плотность укладки обмотки и ее заклиновки.

По обе стороны от бочки располагаются полубочки – цилиндрические поверхности меньшего диаметра, над которыми размещаются лобовые части обмотки ротора и элементы их крепления. Как правило, на полубочках выполняются пазы для вентиляции обмотки ротора и размещения токоподводящих деталей. На внешних краях полубочек располагаются вентиляторы, обеспечивающие охлаждение лобовых частей ротора и статора. За полубочками следуют ступенчатые цилиндрические хвостовики, включающие в себя опорные шейки – поверхности соприкосновения с подшипниками скольжения, а также поверхности, на которых могут располагаться маслоуловители и уплотнения. Кроме того, на хвостовиках располагаются контактные кольца и детали сопряжения ротора турбогенератора с турбиной и возбудителем. Со стороны соединения ротора с возбудителем в валу ротора по его оси выполняется отверстие, в котором размещается стержень токоподвода, обеспечивающий при помощи токоведущих болтов и шин электрическое соединение контактных колец с обмоткой возбуждения.

Ротор турбогенератора, который вращается с синхронной скоростью, оказывается наиболее нагруженным в механическом отношении узлом турбогенератора, поэтому при проектировании вала ротора уделяется большое внимание вопросам обеспечения механической прочности его зубцов, поскольку именно они через пазовый

клин воспринимают всю нагрузку, возникающую от центробежных сил, действующих на обмотку ротора. Самым механически напряженным местом зубца является его основание, имеющее минимальную по высоте зубца ширину $b_{з2min}$ (см. рисунок), которая определяется с помощью оценки значений механических напряжений в данном сечении вала при штатном заполнении пазов и их сопоставления с пределом текучести материала поковки вала ротора. В настоящее время для изготовления валов быстроходных турбогенераторов применяются заготовки из материалов с пределом текучести 600...700 МПа, а для тихоходных – 400...500 МПа. Однако по технологическим соображениям минимальные значения $b_{з2min}$ выбирается в пределах 7...9 мм в зависимости от наружного диаметра бочки вала ротора.

Расчет и оценку параметров ротора турбогенератора для полученной ранее оптимальной геометрии статора была выполнена по методике, представленной в [3], которая применяется в настоящее время при проектировании турбогенераторов. В соответствии с ней при известном наружном диаметре ротора $D_{2н}$ по экспериментальным кривым и номограммам определяется механическое напряжение в зубцах вала ротора $\sigma_{з2пр}$, затем предварительно выбирается высота роторного паза $h_{п2}$, суммарная площадь всех пазов ротора, отношение ширины паза к ширине зубца и число зубцов вала ротора z_2 . После чего, с учетом применяемой в турбогенераторостроении номенклатуры обмоточной меди, согласно рекомендациям из [3] выполняется заполнение паза по ширине и предварительно рассчитывается минимальная ширина зубца. В условиях современного производства возможно изготовление медных полос для роторных обмоток требуемой ширины и толщины, отличных от стандартных, причем стоимость изготовления технологической оснастки для производства нового типоразмера обмоточной меди мала по сравнению с затратами на материал. Размеры роторного паза и его наполнение в радиальном направлении определяются после предварительного расчета номинальной МДС возбуждения F_2 , которую должен развивать ротор при номинальной нагрузке турбогенератора. Она рассчитывается исходя из расчетных значений МДС короткого замыкания статора и заданных значений ОКЗ или статической перегружаемости турбогенератора [3]. Используя

значение МДС F_2 , определяют ожидаемую плотность тока j_2 в обмотке ротора. Затем определяется число витков обмотки возбуждения, уточняются размеры паза и вычисляется ток возбуждения. После чего исходя из принятого значения магнитной индукции в спинке ротора определяют требуемую длину бочки вала ротора. Затем рассчитывается средняя длина витка обмотки возбуждения, сопротивление обмотки постоянному току и напряжение возбуждения U_2 . В завершение расчета роторных пазов выполняется проверка, в ходе которой определяется механическое напряжение в основании зубца σ_{32} при размерах паза, определенных расчетом. Полученная величина σ_{32} сопоставляется со значением предела текучести материала вала ротора. Отношение этих двух величин определяет запас механической прочности. Обычно стремятся обеспечить запас прочности не ниже 1.5.

После расчета зубцовой зоны вала ротора и определения обмоточных данных выполняется

расчет магнитной цепи ротора, в ходе которого определяются МДС в спинке ротора F_{c2} , зубах вала ротора F_{32} и МДС ротора при холостом ходе F_0 , необходимую для создания в воздушном зазоре турбогенератора магнитного потока, который в свою очередь создает заданную ЭДС в обмотке статора и обеспечивает полученное ранее оптимальное значение магнитной индукции в воздушном зазоре. МДС F_0 рассчитывается как сумма МДС стальных участков магнитной системы статора и ротора, а также МДС воздушного зазора. Кроме того, в ходе выполнения расчета магнитной цепи турбогенератора определяются значения магнитной индукции в спинке B_{c2} и в зубах B_{32} вала ротора.

Основные результаты расчета ротора для статора с оптимальной поперечной геометрией, выполненного для 12 турбогенераторов, а также значения промежуточных параметров приведены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что несмотря на уменьшение наружного диаметра ротора в среднем на 10 %, получаются вполне адекватные и характер-

Таблица 2

Параметр ТГ	Номер турбогенератора											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
p	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
δ , мм	28	50	50	65	70	95	95	100	100	75	85	95
D_{2H} , мм	718	907	887	976	953	963	1017	1072	1094	1462	1552	1421
σ_{32np} , МПа	140	210	200	230	230	240	260	280	310	260	310	310
z_2	28	28	28	36	36	36	36	36	36	24	32	32
$b_{п2}$, мм	25.2	31.2	31.8	31.8	29.4	30.6	30.6	28.0	28.0	30.6	28.0	28.0
$h_{п2}$, мм	125.5	138.5	138.5	151.5	151.5	151.5	151.5	151.5	159.5	159.5	159.5	159.5
b_{32min} , мм	11.5	18.3	13.8	10.5	11.5	10.9	12.6	12.3	11.3	17.9	17.1	12.3
$h_{к2}$, мм	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
$h_{п.к2}$, мм	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
$h_{в2}$, мм	12	12	12	12	12	12	12	12	12	24	24	24
$h_{п2}$, мм	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$h_{к.п2}$, мм	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
$b_{в2}$, мм	20.7	26.7	27.3	27.3	24.9	26.1	26.1	23.5	23.5	26.1	23.5	23.5
$F_2 \cdot 10^5$, А	0.80	1.25	0.99	1.67	1.86	2.00	2.61	2.65	3.36	1.79	2.28	2.42
j_2 , А/мм ²	8.03	8.20	7.48	9.12	10.83	10.40	11.70	11.22	13.69	12.13	13.46	14.28
U_2 , В	140	174	169	250	415	557	539	759	479	444	386	492
σ_{32} , МПа	160	181	220	295	273	297	290	287	311	342	361	384
B_{c2} , Тл	1.55	1.69	1.56	1.65	1.66	1.67	1.65	1.71	1.70	1.77	1.89	2.43
B_{32} , Тл	2.11	2.27	2.10	2.52	2.44	2.49	2.46	2.24	2.39	2.30	2.43	2.83
$F_{32} \cdot 10^5$, А	0.044	0.102	0.047	0.131	0.120	0.134	0.131	0.080	0.079	0.115	0.128	0.175
$F_{c2} \cdot 10^4$, А	0.092	0.243	0.131	0.219	0.221	0.234	0.232	0.319	0.310	0.441	1.046	3.508
$F_0 \cdot 10^5$, А	0.327	0.871	0.571	0.874	0.876	0.943	0.957	1.533	1.441	1.228	2.455	3.478

ные для подобных машин значения высоты и ширины роторного паза, а также ширины проводника обмотки ротора. Однако следует отметить, что они несколько разнятся в меньшую сторону с аналогичными параметрами роторов, находящихся в эксплуатации. Полученные в результате расчета механические напряжения в основании зубца вала ротора свидетельствуют о достаточной механической прочности валов проектируемых роторов. Кроме того, значения минимальной ширины зубца находятся в рамках допустимых пределов. Также следует отметить, что плотность тока в обмотке возбуждения также находится в рекомендуемых в [3] пределах. Полученное напряжение возбуждения, а также значения магнитной индукции в зубце и в спинке сердечника ротора характерны для существующих и находящихся в промышленной эксплуатации роторов турбогенераторов.

Основные результаты проведенных в статье исследований могут быть сформулированы в виде следующих положений:

1. Уточнена математическая модель турбогенератора, описывающая оптимальную поперечную геометрию турбогенератора. При использовании данной модели выполнен расчет геометрии

сердечника статора для 12 спроектированных и находящихся в промышленной эксплуатации турбогенераторов. Проведено сравнение полученных в ходе расчета значений параметров сердечников с аналогичными фактическими значениями данных параметров в существующих генераторах. Сравнение показало достаточную близость оптимальных и фактических значений наружного диаметра сердечника статора и ширины паза. Однако имеются серьезные расхождения оптимальных и фактических значений параметров сердечника в радиальном направлении, а именно высот паза и спинки статора. Показано, что оптимальные значения магнитной индукции в воздушном зазоре и относительного диаметра расточки статора оказываются ниже, чем значения данных параметров в существующих машинах.

2. Для 12 турбогенераторов выполнен расчет ротора при условии обеспечения оптимальной поперечной геометрии статора. Показано, что полученные в ходе расчета значения основных параметров ротора оказываются характерными для турбогенераторов. Таким образом, расчетным путем подтверждена возможность проектирования и создания ротора турбогенератора для оптимального по своей поперечной геометрии статора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колупицкий К. А. Оптимизация поперечной геометрии турбогенераторов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2017. № 4. С. 44–49.

2. Ваганов М. А., Колупицкий К. А. Анализ математической модели оптимальной продольно-поперечной геометрии турбогенераторов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2018. № 4. С. 57–66.

3. Хуторецкий Г. М., Токов М. И., Толвинская Е. В. Проектирование турбогенераторов. Л.: Энергоатомиздат, 1987. 256 с.

4. Колупицкий К. А. Этапы модернизации конструкции роторных бандажей турбогенераторов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2016. № 9. С. 38–42.

M. A. Vaganov, K. A. Kolupitsky
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

THE DESIGN OF THE TURBOGENERATOR ROTOR WITH OPTIMUM LATERAL GEOMETRY OF THE STATOR

The mathematical model of the turbogenerator in the static mode of operation is specified, on the basis of which the optimal values of magnetic induction in the air gap and the relative diameter of the stator bore are determined, ensuring the best use of the active materials of the machine relative to its electromagnetic torque. The results of comparing the numerical values of the stator parameters, designed and in operation turbogenerators with the optimal numerical values of the same parameters, but calculated on the basis of the developed mathematical model, the corresponding conclusions. The procedure of designing a turbine generator rotor for a stator with optimal transverse geometry is considered. The questions of the design of the rotor of the turbogenerator as a whole are touched upon. The results of calculating the parameters of the rotors of turbine generators with optimal transverse geometry of the stators and comparing these values with those for the rotors of designed and in operation turbogenerators are evaluated.

Magnetic induction in the air gap, the magnetic induction in the back of the stator core, the magnetic induction in the back of the rotor shaft, the magnetic induction in the teeth of the stator core, the magnetic induction in the teeth of the rotor shaft, relative to the bore diameter of the stator, the relative length of the steel package of the stator, the outer diameter of the steel package of the stator, the height of grooves of the stator and rotor