



УДК 21474

ФЕДОРЕНКО Г.М., докт. техн. наук,
ИВАНОВ А.В., инж., Институт электродинамики НАНУ, г. Киев

ДИНАМИКА ПОТЕРЬ ГИДРОГЕНЕРАТОРА-ДВИГАТЕЛЯ В ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

Приведены результаты численного моделирования потерь в гидрогенераторе-двигателе Днестровской ГАЭС в основных режимах эксплуатации, дан анализ выполненных расчетов.



ФЕДОРЕНКО Г.М.



ИВАНОВ А.В.

Гидрогенераторы-двигатели, которые работают в маневренных режимах эксплуатации, подвергаются циклическому воздействию различных факторов: электромагнитных, тепловых, электродинамических, тепловых, механических и т. д. [1, 2, 3]. Сочетание этих факторов может привести к накапливанию усталостных изменений в отдельных узлах гидрогенераторов-двигателей, что в конце концов приводит к повреждению многих элементов конструкции: зубцов, крайних пакетов сердечника статора и др. [2, 7, 9]

Основные режимы работы обратимого гидроагрегата [4, 5]:

- турбинный (генераторный) режим;
- режим синхронного компенсатора (СК) с турбинным направлением вращения (СКТ);

- насосный (режим работы двигателя) режим;
- режим синхронного компенсатора (СК) в насосном направлении вращения (СКН).

Режим двигателя:

- номинальная мощность $P_{ном.д} = 421$ МВт;
- с перевозбуждением, $I_{вз.хх} = 1170$ А, $I_{вз.н} = 1850$ А.

Генераторный режим:

- номинальная мощность $P_{ном.г} = 324$ МВт;
- $\cos \varphi = 0,979$ с перевозбуждением, $I_{вз.хх} = 1170$ А,

$I_{вз.н} = 1850$ А.

Основные управляющие последовательности работы агрегата:

- пуск в генераторный режим;
- пуск в насосный (двигательный) режим от тиристорного пускового устройства;
- пуск в насосный режим методом "спина к спине";
- пуск в режим СК с турбинным направлением вращения (СКТ);
- пуск в режим СК с насосным направлением вращения (СКН);

- переводные режимы - перевод в режим турбинный (Т), насосный (Н), режимы СК (СКТ и СКН) из любого режима [5, 9];

- нормальный останов;
- аварийный останов от гидромеханических защит;
- аварийный останов от электрической защиты;
- аварийный останов оператором;
- электродинамическое торможение;
- рекуперативное торможение. [5]

По характеру воздействия на надежность гидрогенератора-двигателя все режимы могут быть разделены на три мощностных группы: режимы пусков и остановов, режимы с изменением активной мощности, режимы с изменением реактивной мощности в широком диапазоне

Таблица 1.

Потери, P, кВт	$\cos \varphi = 0,8$	$\cos \varphi = 0,85$	$\cos \varphi = 0,9$	$\cos \varphi = 0,95$	$\cos \varphi = 1,0$
Суммарные потери в обмотке статора	1039	1032	1023	1011	979,9
Основные электрические потери в обмотке статора	431,6	431,6	431,6	431,6	431,6
Добавочные потери в обмотке статора	607,4	600,4	591,4	479,4	548,3
Потери в сердечнике статора	1090,4	1079,2	1065,185	1046,2	997,5
Потери в ярме	541,8	537,5	532,1	524,7	505,4
Потери в зубцах	548,6	541,7	533,1	521,5	492,1
Потери на возбуждение	751	710	657	601	464,3
Потери в роторе	1152,3	1135,7	1129,2	1126,9	1115,6
Суммарные потери	6162,1	6068,1	5962,585	5742,3	5534,4

Таблица 2.

Потери, P, кВт	Активная мощность, МВт				
	45	90	180	270	324
Суммарные потери в обмотке статора	39,74	116	364	738,1	1023
Основные электрические потери в обмотке статора	8,326	33,304	133,217	299,738	431,6
Добавочные потери в обмотке статора	31,414	82,696	230,783	438,362	591,4
Потери в сердечнике статора	1025,4	1031,4	1043,8	1057	1065,2
Потери в ярме	532,1	532,1	532,1	532,1	532,1
Потери в зубцах	493,3	499,3	511,7	524,9	533,1
Потери на возбуждение	321,8	362	459	577,7	657
Потери в роторе	1114,8	1117,9	1119,7	1121,3	1122,6
Суммарные потери	3566,88	3774,7	4394,3	5289,2	5956



вместе с изменением активной мощности от выработки до потребления.

В режимах пусков и остановов из-за различных постоянных времени нагрева и коэффициентов линейного расширения наблюдается перемещение обмотки статора относительно крайних пакетов. Это при жесткой конструкции крепления обмотки может привести к возникновению в нажимных пальцах и зубцах крайних пакетов значительных изгибающих усилий, привести к остаточной деформации нажимных пальцев и к распушке крайних пакетов.

При больших диапазонах изменения нагрузки возникают явления, аналогичные явлениям, которые происходят при пуске и остановке. Эти явления сопровождаются в сердечнике статора циклическими изменениями термомеханических усилий за счет теплового расширения (сжатия) при изменении нагрузки.

Режимы с недо возбуждением при номинальной нагрузке, отличаются повышенным нагревом в концевой зоне, который ограничивает нагрузочную способность генератора.

Для принятия мер, направленных на снижение влияния тепловых факторов на надежность гидрогенераторов-двигателей при переменных графиках нагрузки, необходимо знать распределение потерь в отдельных частях генератора-двигателя при изменении нагрузочного режима.

Наиболее тяжелым с точки зрения надежности являются три режима: режим синхронного компенсатора, генераторный режим и двигательный режим. Поэтому в данной работе была рассчитана динамика потерь именно в этих режимах. Двигательный режим и генераторный были рассчитаны при значениях коэффициента мощности 0,8; 0,85; 0,9; 0,95; 1,0, а режим синхронного компенсатора при значениях коэффициента мощности 0.

Изменение абсолютных значений потерь в основных элементах гидрогенератора-двигателя СВО 1255/255-40 УХЛ4 при активной постоянной нагрузке 324 МВт и 421 МВт в генераторном и двигательном режимах и изменении коэффициента мощности от 0,8

до 1,0 приведены в Табл. 1 и Табл. 3 в генераторном и двигательном режимах соответственно.

Температурное поле в выделенном элементе крайнего пакета можно описать системой дифференциальных уравнений в цилиндрических координатах [8], состоящей из уравнений теплопроводности и уравнений для подогрева окружающей среды в соответствующем i -м канале [7, 8]:

$$\begin{cases} \text{ср} \frac{\partial \Theta}{\partial t} = \lambda_r \left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Theta}{\partial r} \right) + \\ + \lambda_\phi \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \phi^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} + q(r, \phi, z, t) \\ \frac{c_{ri} P_{ri}}{\alpha_i b_i} \left(F_i \frac{\partial \Theta_{ri}}{\partial t} + Q_i \frac{\partial \Theta_{ri}}{\partial x} \right) + \Theta_{ri} = \Theta \quad (i = 1, 2, 3, 4 \dots) \end{cases}$$

с граничными условиями:

$$\Theta_{г.ф.} = \Theta - \frac{\lambda_z}{\alpha_\phi} \frac{\partial \Theta}{\partial z} \quad \text{при } z = 0;$$

$$\Theta_{г.с.} = \Theta + \frac{\lambda_z}{\alpha_c} \frac{\partial \Theta}{\partial z} \quad \text{при } z = b;$$

$$\Theta_{г.з.} = \Theta - \frac{\lambda_r}{\alpha_3} \frac{\partial \Theta}{\partial r} \quad \text{при } r = r_0;$$

$$\Theta_{г.к.} = \Theta + \frac{\lambda_r}{\alpha_k} \frac{\partial \Theta}{\partial r} \quad \text{при } r = r_2;$$

Таблица 3.

Потери, P, кВт	cos φ = 0.8	cos φ = 0.85	cos φ = 0.9	cos φ = 0.95	cos φ = 1.0
Суммарные потери в обмотке статора	1484	1472	1457	1437	1385
Основные электрические потери в обмотке статора	615,795	615,795	615,795	615,795	615,795
Добавочные потери в обмотке статора	868,205	856,2	841,205	821,205	769,2
Потери в сердечнике статора	1308,6	1298	1284,8	1284,9	1221,9
Потери в ярме	587,5	587,5	587,5	587,5	587,5
Потери в зубцах	721,1	710,5	697,3	697,4	634,4
Потери на возбуждение	837,7	790,3	730,9	664,7	507,4
Потери в роторе	1174,5	1159,04	1148,2	1141,9	1131,6
Суммарные потери	7597,4	7489,335	7362,7	7250,4	6852,795

Таблица 4.

Потери, P, кВт	Активная мощность, МВт				
	97,9	195,8	293,7	391,6	421
Суммарные потери в обмотке статора	118,8	370	746,2	1245	1420
Основные электрические потери в обмотке статора	33,3	133,217	299,7	532,8	615,8
Добавочные потери в обмотке статора	85,5	236,78	446,5	712,2	804,2
Потери в сердечнике статора	1220,9	1229,1	1238,1	1248,1	1251,3
Потери в ярме	587,5	587,5	587,5	587,5	587,5
Потери в зубцах	633,4	641,6	650,7	660,7	663,9
Потери на возбуждение	315,9	380,2	466,2	574	610,6
Потери в роторе	1126,7	1131,6	1132,2	1133,5	1134,8
Суммарные потери	4122	4709,997	5567,1	6693,8	7088,1



Таблиця 5. Потери в режиме синхронного компенсатора

Потери, P, кВт	Активная мощность, МВт
	0
Суммарные потери в обмотке статора	1322,922
Основные электрические потери в обмотке статора	631,215
Добавочные потери в обмотке статора	691,707
Потери в сердечнике статора	1335,1
Потери в ярме	756,6
Потери в зубцах	578,5
Потери на возбуждение	2068,17
Потери в роторе	2157,8
Суммарные потери	9542,014

лах между пакетами, в зазоре между статором и ротором, при выходе из спинки и в шлице соответственно, λ – коэффициент теплопроводности; ρ, ρ_{gi} – плотность шихтованного пакета железа.

В Табл. 2 и Табл. 4 показаны изменения абсолютных значений потерь в основных элементах гидрогенератора-двигателя СВО 1255/255-40 УХЛ4 при изменении активной нагрузки от мощности холостого хода до 324 МВт в генераторном режиме и от 0 до 421 МВт в двигательном режиме при значениях коэффициента мощности 0,9 и 0,979.

В Табл. 5 показаны значения потерь гидрогенератора-двигателя СВО 1255/255-40 УХЛ4 при работе его в двигательном режиме в режиме синхронного компенсатора.

На Рис. 1 и Рис. 2 представлены графики потерь в генераторном и двигательном режимах, соответственно.

Выводы.

1. При изменении коэффициента мощности от 0,8 до 1,0 в генераторном режиме, суммарные потери в генераторе-двигателе уменьшаются от 6162,1 кВт до 5534,4 кВт, а изменение активной мощности от 45 МВт до 324 МВт приводит к увеличению суммарных потерь, которые изменяются в диапазоне от 3566,88 кВт до 5956,0 кВт

2. При изменении коэффициента мощности от 0,8 до 1,0 в двигательном режиме, суммарные потери уменьшаются от 7597,4 кВт до 6852,795, а изменение активной мощности от 97,9 МВт до 421 МВт приводит к увеличению суммарных потерь в диапазоне от 4122 кВт до 7088,1 кВт.

$$\Theta_{г.ш.} = \Theta - \frac{\lambda_{\phi}}{\alpha_{ш}} \frac{\partial \Theta}{\partial \phi} \text{ при } \phi = 0 \text{ и } r_0 \leq r \leq r_1;$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \phi} = 0 \text{ при } \phi = 0 \text{ и } r_1 \leq r \leq r_2;$$

$$\Theta_{г.ш.} = \Theta + \frac{\lambda_{\phi}}{\alpha_{ш}} \frac{\partial \Theta}{\partial \phi} \text{ при } \phi = \phi_0 \text{ и } r_1 \leq r \leq r_3;$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \phi} = 0 \text{ при } \phi = \phi_0, r_0 \leq r \leq r_1, r_1 \leq r \leq r_2;$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial r} = 0 \text{ на границе между пакетом и дном паза при } r = r_1;$$

$\Theta_{г.ш.} = \Theta + \frac{\lambda_r}{\alpha_{ш}} \frac{\partial \Theta}{\partial r}$ для поверхности шлица в зубцах при $r = r_1$, где Θ – температура пакета в рассматриваемой области, $\alpha_{\phi}, \alpha_c, \alpha_s, \alpha_k, \alpha_{ш}$ – коэффициенты теплоотдачи с поверхностей, обращенных к корпусу гидрогенератора-двигателя, сердечнику статора, зазором между статором и ротором, нажимном фланце, и с поверхности шлицов; α_i – коэффициент теплоотдачи в соответствующем i -м канале; c, c_{gi}, Q_i – удельные теплоемкости пакета и газа, расход газа в соответствующем канале; F_p, b_i – площадь поперечного сечения и ширина соответствующего вентиляционного канала; $\Theta_{г\phi}, \Theta_{гс}, \Theta_{гз}, \Theta_{гк}, \Theta_{гш}$ – среднemasовые температуры охлаждающего газа в каналах между нажимным фланцем и крайним пакетом, в кана-

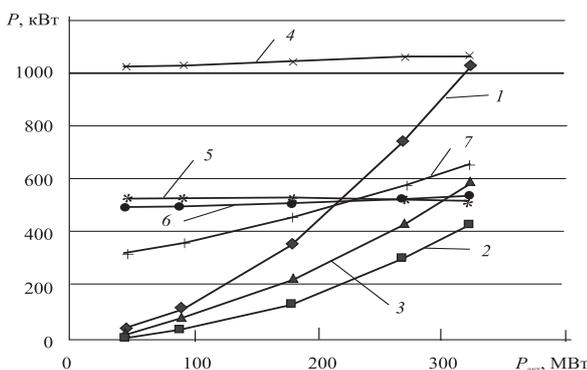


Рис. 1. Потери в генераторном режиме работы: 1 – потери в обмотке статора, 2 – омические потери, 3 – добавочные потери, 4 – потери в сердечнике статора, 5 – потери в ярме, 6 – потери в зубцах, 7 – потери на возбуждение.

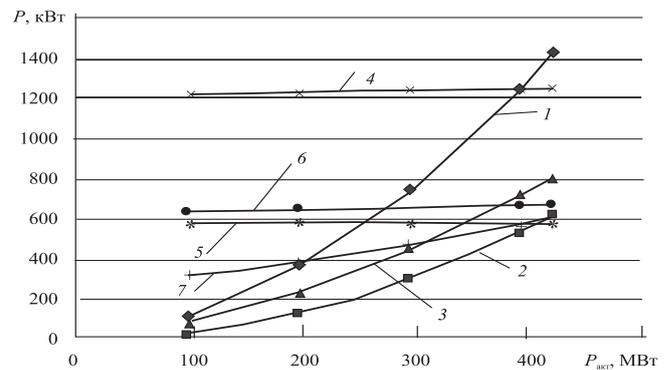


Рис. 2. Потери в двигательном режиме работы: 1 – потери в обмотке статора, 2 – омические потери, 3 – добавочные потери, 4 – потери в сердечнике статора, 5 – потери в ярме, 6 – потери в зубцах, 7 – потери на возбуждение.



3. Наибольшие потери в машине возникают при работе машины в режиме синхронного компенсатора, по сравнению с номинальным режимом они увеличиваются на 2453,914 кВт.

4. При переменных графиках нагрузки потери, выделяющиеся в основных элементах генератора-двигателя, изменяются в широких пределах, что необходимо учитывать при расчетах миграции максимальных температур.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Поташиник С.И., Рассовский В.Л., Жук А.П., Мартинчик В.Ф., Бондаренко Ю.П.* Пуск первого гидроагрегата Днестровской ГАЭС // Гидроэнергетика Украины. — 2009. — № 3. — С. 6–20
2. *Счастливый Г.Г., Федоренко Г.М., Выговский В.И.* "Турбо- и гидрогенераторы при переменных графиках нагрузки" — Киев: Наук. думка, 1985. — 208 с.
3. *Счастливый Г.Г., Федоренко Г.М., Бут А.А., Чемерилов И.Я.* Динамика нагрева и потерь турбогенератора мощностью 200 МВт при переменных графиках нагрузки. // Электротехническая промышленность, сер. Электрические машины. — 1980. — вып. 11. — С. 12–28.

4. *Поташиник С.И., Грубой А.П., Шофул А.К., Кошелев В.В., Лицов В.И., Логвинов В.П., Битюцкий Н.Л., Бузивский О.В., Берченко Ю.И.* Результаты электрических и тепловых испытаний гидрогенератора-двигателя СВО 1255/255-40ХЛ4 ст. № 1 Днестровской ГАЭС // Гидроэнергетика Украины. — 2011. — № 1. — С. 7–12.

5. *Гришь В.А.* Особливості експлуатаційних режимів енергоблока Дністровської ГАЕС. // Гидроэнергетика Украины. — 2009. — № 3. — С. 17–2.

6. *Пустоветов В.Ф., Вовк В.И.* Вклад завода "Электротяжмаш" в развитие строительства ГАЭС - история и перспективы // Гидроэнергетика Украины. — 2005. — № 2. — С. 46-49.

7. *Счастливый Г.Г., Семак В.Г., Федоренко Г.М.* Погружные асинхронные электродвигатели. — М. : Энергоатомиздат. — 1983. — С. 100–101.

8. *Федоренко Г.М.* Научные основы локальной интенсификации охлаждения и температурной диагностики турбогенераторов и жидкостно-наполненных электрических машин / Дис. докт. техн. наук. — Киев, 1990. — 250 с.

9. *Федоренко Г.М., Саратов В.А.* Новые технологии повышения эффективности на основе использования АСТГ и СТК // Техническая электродинамика, тем. вып. Ч II. 1999. - с 3-8. / Міжнародна конференція "Силова електроніка і енергоефективність", Україна, Крим, Алушта, 1999 р.

© Федоренко Г.М., Иванов А.В., 2011

