

Д.В. ЗУБИТАШВИЛИ, Я.Г. БИДЖАМОВ

О НЕКОТОРЫХ ФОРМАХ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ НА ОБЪЕКТАХ ЭНЕРГЕТИКИ

Показана возможность снижения добавочных потерь и повышения КПД эксплуатируемых гидрогенераторов путем внесения некоторых конструктивных изменений в их полюсных наконечниках. Рассмотрена методика оценки этих потерь как до, так и после выполнения реконструкции. Приведены примеры практического осуществления мероприятий по снижению добавочных потерь в полюсах гидрогенераторов.

Ключевые слова: гидрогенератор, ротор, потери, реконструкция, энергосбережение.

В структуре энергосбережения в промышленности значительное место занимают вопросы внедрения энергосберегающих технологий и повышения коэффициента полезного действия (КПД) действующих технологических и энергетических установок. На внедрение энергосберегающих технологий возлагается около 40% всего объема энергосбережения. При этом, например к 2000 году, более 20% всей экономии энергоресурсов должны были дать крупные научно-технические мероприятия, подлежащие разработке и внедрению.

Разрыв экономических отношений между странами после развала бывшего Союза внес значительные коррективы в экономику и перспективы развития энергетики этих стран [1]. Например, в Грузии, как и в других странах СНГ, в 90-х годах произошел резкий спад энергопотребления в промышленности [2]. Вместе с тем фактическое разрушение газового и теплового хозяйства привело к резкому росту электропотребления в коммунально-бытовом секторе. Всё это на фоне отсутствия возможности ввода новых генерирующих мощностей, а также снижения качества обслуживания и ремонта имеющихся мощностей легло тяжелым бременем на энергосистему республики. В связи с этим осуществление отмеченных выше мероприятий по энергосбережению приобретает ещё большую актуальность.

Эти мероприятия, в частности, могут касаться не только эксплуатируемых, но и вновь строящихся или реконструируемых объектов энергетики. При этом особую ценность приобретают разработки, внедрение которых не требует значительных капитальных вложений. К их числу могут быть отнесены некоторые работы, выполненные в Грузинском научно-исследовательском институте энергетики и энергетических сооружений (ГрузНИИЭС), касающиеся электромагнитных параметров и режимов работы мощных генераторов гидроэлектростанций.

Отмеченные разработки основаны на исследовании выявленных в генераторах ранее не учитываемых потерь, совершенствовании расчетов некоторых параметров гидрогенераторов и на их основе разработке новых конструктивных решений и мероприятий, снижающих потери электроэнергии при её выработке. Покажем это на примере исследования потерь в полюсных наконечниках крупных гидрогенераторов.

Как известно, основная часть находящихся в эксплуатации генераторов стран бывшего Союза была изготовлена до 80-х годов прошлого столетия. При проектировании гидрогенераторов в основе электромагнитных расчетов, связанных с контурами роторов, положено упрощающее допущение о бесконечно большой магнитной проницаемости стали [3-5]. Это и другие допущения приводят к тому, что при расчете параметров демпферных обмоток пренебрегают вихревыми токами и потерями в шихтованных листах полюсных наконечников от потоков рассеяния демпферной обмотки, а также в щеках полюсов, сквозь которые проходят стержни обмотки. Таким образом, оказывается неучтенной достаточно большая часть потерь на пути замыкания потоков рассеяния. Эти потоки связаны с токами в демпферных стержнях, наведенными несинхронными магнитодвижущими силами (МДС) статора, вращающимися относительно ротора.

Наибольшая часть добавочных потерь выделяется в полюсных наконечниках гидрогенераторов. Поэтому от правильного решения задач расчета параметров демпферной обмотки, выделения и распределения потерь на поверхности полюсов в значительной мере зависят в целом энергоэкономические показатели генераторов.

На основе выполненных в ГрузНИИЭС работ [3,4 и др.], основанных на учете реальной электромагнитной картины поля, появилась возможность определения реальных параметров контуров полюсного наконечника и потерь, выделяющихся в них. Эти результаты могут быть использованы не только на стадии проектирования новых высокоэффективных гидрогенераторов, но также и при исследовании реальных энергетических показателей эксплуатируемых генераторов.

Для оценки отмеченных параметров приведен пример исследования потерь в щеках полюсов гидрогенератора СВФ 1690/175-64 Красноярской ГЭС [3]. Для этого была изготовлена модель-фрагмент щеки полюсного наконечника гидрогенератора Красноярской ГЭС, воспроизводящая натуру в основных ее деталях и особенностях. Кроме того, для исследования параметров и потерь полузакрытого паза и сравнения их с закрытым в модели над одним из стержней была выполнена прорезь.

Потери в стали от тока V -й частоты определяются по [4] или из выражения

$$P_{cv} = I_{cv}^2 r_0 K_{rcv}, \quad (1)$$

где I_{cv} - действующее значение тока в стержне V -й частоты, A ; r_0 - активное сопротивление круглого стержня в пределах длины щеки, Om ; K_{rcv} - условный коэффициент вытеснения, учитывающий все влияющие факторы.

Этот коэффициент также рассчитывается по [4], а по экспериментальным данным - из соотношения

$$K_{rcv} = P_{cv} / P_0, \quad (2)$$

где P_0 - потери в материале стержня от постоянного тока, равного по величине I_{cv} .

Величина K_{rcv} сильно зависит от магнитной проницаемости стали на пути замыкания пульсирующего потока, определяемой наложением на этот поток части основного потока генератора, замыкающегося через козырек щеки. Кроме того, K_{rcv} зависит от величины и частоты тока, проходящего через демпферный стержень.

Используя результаты расчетно-экспериментального определения K_{TSV} [3] для токов в стержнях I_{CV} , полученных Межведомственной комиссией для номинального режима работы генератора СВФ 1690/175-64 с однослойной обмоткой статора, нами были рассчитаны потери в щеках полюсов этих генераторов. Расчеты показали, что при однослойной обмотке трансформаторные потери в щеках весьма значительны и для исследованного генератора составляют более 280 кВт.

С целью значительного снижения потерь в козырьке щеки над каждым демпферным стержнем следует сделать прорези. Это существенно снизит пульсирующий поток и связанные с ним потери. На рисунке приведен эскиз полюсного наконечника гидрогенератора с прорезями 4 на поверхности щеки 3 над каждым из стержней 2. Демпферные стержни на торце соединены короткозамыкающим сегментом 5. В шихтованной части 1 полюсного наконечника показаны известные полузакрытые пазы. Выполнение предлагаемых прорезей 4 в щеках полюсов значительно увеличивает магнитное сопротивление пути замыкания потока рассеяния вокруг демпферных стержней 2. Уменьшение магнитной проводимости приводит к снижению магнитного потока и соответственно к уменьшению потерь в щеке. Последнее повышает КПД генератора, а уменьшение индуктивного сопротивления рассеяния стержней улучшает демпфирующие свойства обмотки.

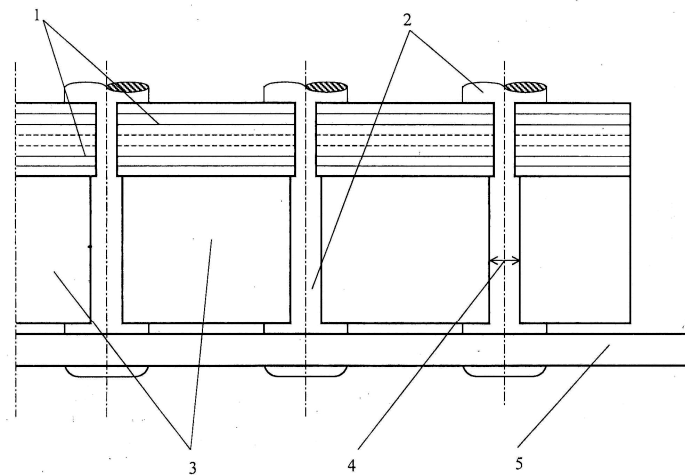


Рис. Эскиз фрагмента полюсного наконечника гидрогенератора с прорезями в нажимных щеках

Ширина прорези $b_{\text{ш}}^*$, при которой потери в стали щеки будут минимальны, может быть определена по формуле

$$b_{\text{ш}}^* = d_c \cdot \sqrt{1 - (d_c/2 \cdot h_0)^2}, \quad (3)$$

где d_c - диаметр отверстия под демпферный стержень; h_0 - расстояние от оси стержня до поверхности щеки или полюса, состоящее из суммы высоты мостика h_m и $d_c/2$.

Коэффициент магнитной проводимости паза по шлицу при различных величинах прорезей $b_{ш}$ или углов раскрытия паза ($2 \cdot \alpha$) определяется из выражения

$$\lambda_{ш} = 0,623 + \frac{h_m + \frac{d_c}{2} \cdot (1 - \cos\alpha)}{d_c \cdot \sin\alpha} \quad (4)$$

Следует отметить, что не всегда полученное значение $b_{ш}^*$ может быть приемлемым для модернизации полюса. Оптимальная величина ширины шлица должна быть выбрана с учетом прочностных параметров паза, позволяющих удерживать стержень в пазу от центробежных и других механических усилий, возникающих в процессе работы гидрогенератора.

В табл. 1 приведены результаты экспериментального определения коэффициентов увеличения активного сопротивления K_{rsv} [3] для паза с прорезью 6 мм, с целью их сравнения с данными закрытого паза, при геометрии щеки полюсов генератора СВФ 1690/175-64 Красноярской ГЭС. Как видно из таблицы, K_{rs} в пазе с прорезью уменьшается в 7...10 раз. Следовательно, пропорционально ему также снизятся потери в щеках в случае выполнения в них прорезей, т.е. при тех же токах в стержнях потери окажутся в 7...10 раз меньше.

На приведенном примере показано, как ощутимо может быть снижена одна из составляющих добавочных потерь гидрогенератора. Аналогичное исследование может быть выполнено для закрытых пазов на шихтованной части полюсного наконечника, где может быть получен еще больший экономический эффект.

Таблица 1

Паз	I_{cv}, A	Частота тока в стержне, Гц				
		100	150	200	300	400
без прорези	100	85,4	109	127	158	194
	300	93,2	124	145	173	215
	500	88,3	112	134	171	195
с прорезью	100	8,44	13,2	18,1	27,3	35,3
	300	8,47	12,2	16,2	24,9	30,9
	500	8,29	11,5	15,4	23,45	28,6

Выполнение указанных работ позволит не только повысить КПД по каждому из эксплуатируемых гидрогенераторов, но и улучшит условия и надежность их работы как в нормальных, так и в переходных и специальных режимах.

Определение экономической целесообразности тех или иных мероприятий для каждого конкретного генератора должно быть выполнено на основании детального исследования его реального состояния с последующей разработкой и осуществлением допустимых и обоснованных расчетов необходимых конструктивных изменений.

Все вышеприведенное впервые было внедрено нами на уровне изобретения [6] при реконструкции полюсов генераторов ДнепроГЭС-2. Эта работа явилась логическим продолжением работ, связанных с исследованием причин повреждения гидрогенераторов СВ 1230/140-56 и разработкой мероприятий по их устранению.

Необходимо отметить, что сравнение результатов исследования теплового поля штатных и модернизированных полюсов, выполненного ГрузНИИЭС на Г-13 ДнепроГЭС-2, показало значительную эффективность проведенной модернизации. Среднее превышение температуры полюсных наконечников модернизированных полюсов оказалось почти в 1,5 раз ниже, чем при неразрезанных щеках. В табл. 2 приводится сравнение средних превышений температур ΔT в $^{\circ}C$ над охлаждающим воздухом конструктивных частей исследуемых полюсов в некоторых режимах работы генератора.

Таблица 2

Режим работы генератора	Штатный полюс				Модернизированный полюс			
	к.з. сегм.	щеки	медь	сталь	к.з. сегм.	щеки	медь	сталь
Синхр. компенс.	47	51	65	58	23	34	26	34
80 МВт, 98 МВар	53	62	72	82	32	55	47	47
113 МВт, 20 МВар	64	76	84	102	63	63	64	67

Уменьшение нагрева не только поверхности щек, но и других частей полюса, особенно шихтованной стали, является следствием уменьшения доли тока, замыкающегося в демпферной обмотке по стали полюсного наконечника. Это оказалось возможным из-за снижения индуктивного сопротивления демпферных стержней в области прохождения их через массивные щеки, что дало возможность замыкания основной части токов стержней через короткозамыкающие сегменты, а не через сталь.

Понятно, что снижение нагрева полюсного наконечника связано с уменьшением выделяющихся в нем потерь. Если потери в щеках могут быть нами определены расчетным путем по [3,4], то потери в стали оценить трудно из-за вероятностного характера величины тока, ответвляющегося от стержня в сталь. Поэтому для определения величины снижения потерь в полюсных наконечниках при разрезанных щеках была использована известная связь потерь со средним превышением температуры поверхности полюсного наконечника [7]

$$\Delta P = \alpha S \Delta T. \quad (5)$$

Согласно результатам испытания, снижение температуры ΔT полюсного наконечника после внедрения рекомендаций и предложенной в [7] конструкции щеки составило $39^{\circ}C$. Учитывая площадь поверхности полюса генератора ДнепроГЭС-2 $S=8750 \text{ см}^2$, а также значение коэффициента теплоотдачи, рассчитанного согласно [7]:

$$\alpha = \frac{1 + 0,1 \cdot \tau}{450}, \quad (6)$$

где $\tau = 65$ см, снижение потерь на полюс оказывается $5,7 \text{ кВт}$. На весь генератор типа СВ 1230/140-56 это составляет $\Delta P = 5,7 \cdot 56 = 319 \text{ кВт}$.

Снижение добавочных потерь в полюсах на указанную величину соответственно приводит к повышению КПД генератора. Полученная дополнительная выработка при возможной реконструкции щек полюсов всех 16-ти генераторов

ДнепроГЭС-2 (при среднегодовой наработке генератора 5000 часов согласно расчетам внедряющей организации) составляет более 25 млн. кВт часов электроэнергии в год.

Таким образом, положительный эффект от предложенной модернизации полюсов заключается не только в повышении демпфирующих возможностей обмотки, значительном улучшении теплового состояния генератора, снижении вероятности появления выявленного нами эффекта электроэрозии, приведшего к повреждению демпферной обмотки генераторов ДнепроГЭС-2, но и в некоторой экономии энергоресурсов.

Как отмечалось выше, аналогичные работы могут быть выполнены на большинстве гидрогенераторов, эксплуатируемых в странах бывшего Союза. Это касается, в частности, энергосистем Армении и Грузии, где в эксплуатации находится значительная часть гидрогенераторов, построенных в 60-х годах прошлого века. Как показали обследования полюсов некоторых генераторов в Грузии, имеются достаточные резервы снижения в них добавочных потерь. Так, например, на генераторах ХрамГЭС-2 обнаружены следы значительных перегревов в области закрытых пазов как в щеках, так и в шихтованной части полюсных наконечников. Это свидетельствует о наличии значительных потерь в стали от потоков рассеяния вокруг стержней демпферной обмотки. Задача заключается в реализации возможности исследования этих потерь для количественной оценки эффективности от последующей разработки и внедрения необходимых энергосберегающих мероприятий, связанных с модернизацией полюсов этих гидрогенераторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Зубиташвили Д.В., Арвеладзе Р.Д.** Некоторые проблемы энергетики. – Тб.: Энергия, 1977. – № 1. – С. 7-16 (на груз. яз.).
2. **Зубиташвили Д.В.** Состояние и перспективы энергопотребления в промышленности Грузии. – Тб.: Энергия, 2002. – № 1(21). – С. 42-46 (на груз. яз.).
3. **Тер-Газарян Г.Н., Биджамов Я.Г.** Потери в щеках мощных гидрогенераторов // Электротехника. – 1986. – №10. – С. 57-60.
4. **Биджамов Я.Г.** Расчет параметров демпферных стержней гидрогенераторов // Исслед. по вопросам энергетики и энергоресурсов в горных условиях: Сб. ст. ГрузНИИЭГС.- М.: Энергоатомиздат, 1986. – С. 70-77.
5. **Иванов-Смоленский А.В.** Электрические машины. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
6. **Тер-Газарян Г. Н., Биджамов Я. Г., Овакимян А.С.** Полюс гидрогенератора. А.с. СССР SU №1270836 А1, кл. 4 Н 02 К 1/24, 15.11.86, Бюл. №42.
7. **Филипов И. Ф.** Теплообмен в электрических машинах.–Л.: Энергоатомиздат, 1986. –256 с.

ГрузНИИЭЭС. Материал поступил в редакцию 10.05.2003.

Դ.Վ. ԶՈՒԲԻՏԱՇՎԻԼԻ, ՅՈՒ.Գ. ԲԻՋԱՄՈՎ

**ԷՆԵՐԳԵՏԻԿԱՅԻ ՕԲՅԵԿՏՆԵՐՈՒՄ ԷՆԵՐԳԱԽՆԱՅՈՂՈՒԹՅԱՆ ՈՐՈՇ
ՁԵՎԵՐԻ ՄԱՍԻՆ**

Ցույց է տրված շահագործվող հիդրոգեներատորի բևեռային ծայրապանակներում կատարված կառուցվածքային փոփոխությունների միջոցով ՕԳԳ-ի բարձրացման և լրացուցիչ կորուստների նվազեցման հնարավորությունը: Դիտարկված է այդ կորուստների մեթոդիկան վերակառուցումից առաջ և հետո: Բերված են հիդրոգեներատորների բևեռներում լրացուցիչ կորուստների նվազեցման միջոցառումների գործնական իրականացման օրինակներ:

D.V. ZUBITASHVILI, Ya.G. BIJAMOV

SOME WAYS OF ENERGY SAVING ON POWER ENGINEERING ENTERPRISES

Additional losses and the efficiency of operating hydrogenerators increased by certain structural changes in the pole pieces can be reduced. The procedure of assessment of these losses before and after the reconstruction is considered. The examples of practical measures on the reduction of additional losses in the poles of hydrogenerators are given.