

УДК 621.311

## Анализ влияния несимметричных режимов нагрузки на условия работы гидрогенераторов каскада Нивских ГЭС

А.Е. Веселов<sup>1</sup>, Ю.М. Невретдинов<sup>1</sup>, Ю.В. Неклюдов<sup>2</sup>, А.С. Карпов<sup>1</sup>,  
В.В. Ярошевич<sup>1</sup>, Е.А. Токарева<sup>1</sup>, Л.В. Сенюшина<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН,  
лаборатория надежности и эффективности оборудования  
энергосистем

<sup>2</sup> Политехнический факультет МГТУ

**Аннотация.** Выполнен анализ влияния токовых воздействий нагрузки ОАО "КАЗ" при несимметричных режимах на гидрогенераторы ГЭС-3 каскада Нивских ГЭС посредством оценки крутильных колебаний и тангенциальных вибраций в генераторах. Показано, что тангенциальные усилия двойной частоты (100 Гц) практически не создают существенных вибросмещений при отстройке собственной частоты корзины лобовых частей. Величины вибраций и ударные смещения значительно возрастают в окolorезонансной области. Сделан вывод о том, что при наложении ударных токов вследствие их интенсивного воздействия имеет место ускорение расхода ресурса гидротурбин и увеличение частоты проведения ремонтных работ.

**Abstract.** The analysis of the current actions of Joint Stock Company KAZ load on the hydroelectric power station NIVA-3 generators with the asymmetrical regimes by means of estimation of torsional oscillations and tangential vibrations in the generators has been executed. It has been shown that the double frequency tangential force practically does not create significant vibration displacements with the natural frequency offset of the frontal parts basket. The vibration rates and shock displacements considerably increase in the near-resonant region. The conclusion has been made that the intensive action of the transient currents superposition is the result of the reducing of the water turbines replacement life and an increase in the remedial maintenance frequency.

### 1. Введение

Анализ режимов работы системы электроснабжения ОАО "Кандалакшский алюминиевый завод" (КАЗ) показал, что существующая схема питания мощной нелинейной нагрузки КАЗ непосредственно с шин генераторного распределительного устройства 10 кВ ГЭС-3 каскада Нивских ГЭС оказывает негативное влияние на условия функционирования гидрогенераторов, которое проявляется в повышенном расходе их ресурсов, в том числе в увеличении виброперемещений. Причиной ускоренного износа оборудования являются наличие систематических интенсивных ударных действий при резких изменениях тока нагрузки, а также повышенная эмиссия токов, сопровождающих переходные процессы. Кроме того, нагрузка КАЗ генерирует высшие гармоники, достигающие и превышающие предельно допустимые по ГОСТ уровни.

Поэтому основной задачей является разработка технических мероприятий по существенному снижению эмиссии в сеть генераторного напряжения 10 кВ ударных токов, высших гармоник и токов, сопровождающих переходные процессы.

### 2. Исследование влияния режимов нагрузки на работу гидрогенераторов

При несимметричных нагрузочных режимах гидрогенератора возникают усилия, нехарактерные для нормальной работы. В частности, возникает знакопеременный электромагнитный момент двойной синхронной частоты, приводящий к крутильным колебаниям стальных конструкций статора и обмотки и возникновению радиальной силы магнитного тяжения полюсной частоты (*Xu Shizhang*, 1983). Эти силы возбуждают радиальные вибрации сердечника. Оценку вибрационных усилий выполняем в соответствии с методикой (*Надточий, Цветков*, 1989).

Радиальная составляющая погонной силы  $F_0$  пропорциональна индукции  $B$  в воздушном зазоре, которую можно представить в виде волн прямой  $B_1$  и обратной  $B_2$  последовательностей.

$$F_0 = (B_1 B_2 l) / 2\mu_0 \cdot \cos(2\omega t - \gamma_2), \quad (1)$$

здесь  $\gamma_2$  – некоторый фазовый угол;  $l$  – активная длина машины.

Крутильные колебания стальных конструкций статора возникают под действием знакопеременного электромагнитного момента  $M$  частоты  $2\omega$ . Для оценки погонной тангенциальной силы, соответствующей моменту  $M$ , принимаем следующее. В несимметричных нагрузочных режимах относительное значение момента  $M$  приблизительно равно току обратной последовательности  $i_2$  (в относительных единицах), вследствие чего для тангенциальной силы можно записать:

$$T_0 = (M_n \cdot i_2) / 2\pi \cdot R_1^2, \quad (2)$$

где  $M_n$  – номинальный момент генератора;  $R_1$  – радиус сердечника.

Связь тангенциальных усилий и перемещений представлена в виде системы из двух уравнений:

$$\begin{aligned} -4\omega^2 m_1 W_1 + k_{r1}(W_1 - W_2) &= M/2\pi \cdot R_1^2 = T_0; \\ -4\omega^2 m_2 W_2 + k_{r1}(W_2 - W_1) + k_{r2} W_2 &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь  $W_1, W_2$  – амплитуды тангенциальных перемещений, соответственно сердечника и корпуса;  $m_1, m_2$  – погонные массы сердечника (вместе с обмоткой) и корпуса;  $k_{r1}, k_{r2}$  – жесткости связи в тангенциальном направлении, соответственно, между сердечником и корпусом, корпусом и фундаментом;  $T_0$  – погонная тангенциальная сила, соответствующая моменту  $M$ .

Отсюда амплитуда тангенциального перемещения сердечника равна:

$$W_1 = T_0 / [-4\omega^2 m_1 + (k_{r1} \cdot (k_{r2} - 4\omega^2 m_2)) / (k_{r1} + k_{r1} - 4\omega^2 m_2)]. \quad (4)$$

Для оценки вибраций лобовых частей обмотки статора в первом приближении принимаем наличие одной степени свободы для корзины лобовых частей, т.е.

$$4\omega^2 m_0 A - k_0(A - W_1) = 0.$$

Вибрация возбуждается сердечником, амплитуда колебаний которого  $W_1$ . Здесь  $m_0, k_0, A$  – эквивалентные масса, жесткость и абсолютная амплитуда колебаний корзины лобовых частей.

Отсюда получаем абсолютную  $A$  и относительную  $(A - W_1)$ , амплитуды колебаний равны:

$$A = W_1 / (1 - 4\omega^2 \cdot \omega_0^{-2}), \quad A - W_1 = 4\omega^2 \cdot \omega_0^{-2} / (1 - 4\omega^2 \cdot \omega_0^{-2}) \cdot W_1, \quad (5)$$

где  $\omega_0 = \sqrt{(k_0/m_0)}$  – частота собственных колебаний корзины лобовых частей при кинематическом возбуждении корзины.

Оценку радиальных сил магнитного тяжения в несимметричных нагрузочных режимах и возбуждаемых ими магнитных вибраций выполняем с учетом того, что погонная сила магнитного тяжения  $F(\varphi, t)$  равна

$$F(\varphi, t) = 1/2 \cdot \mu_0 \cdot [B(\varphi, t)]^2 \cdot l, \quad (6)$$

где  $B(\varphi, t) = B_1 \cos(p\varphi - \omega t) + B_2 \cos(p\varphi + \omega t - \gamma_2)$ ;  $t, \varphi$  – время и угловая координата;  $\gamma_2$  – фазовый угол;  $p$  – число пар полюсов.

Принимаем  $B_1 = B_n$  и  $B_2 = x_2 \cdot i_2 \cdot B_n$ , где  $B_n$  – номинальная индукция в воздушном зазоре,  $T_n$ ;  $x_2$  – реактивное сопротивление обратной последовательности, в относительных единицах.

Отсюда амплитуда радиальной силы  $F_0$  может быть определена из выражения

$$F_0 = 1/2 \cdot \mu_0 \cdot B_n^2 \cdot l \cdot x_2 \cdot i_2 = 4 \cdot 10^5 \cdot B_n^2 \cdot l \cdot x_2 \cdot i_2. \quad (7)$$

Введя жесткости связи в радиальном направлении между сердечником и корпусом –  $k_{r1}$ , между корпусом и фундаментом –  $k_{r2}$ , а также амплитуды радиальных перемещений сердечника  $U_1$  и корпуса  $U_2$ , можно получить следующие уравнения:

$$F_0 = -4\omega^2 m_1 U_1 + k_1 U_1 + k_{r1}(U_1 - U_2), \quad (8)$$

$$0 = -4\omega^2 m_2 U_2 + k_2 U_2 + k_{r1}(U_2 - U_1) + k_{r2} U_2. \quad (9)$$

Величины  $k_1$  и  $k_2$  представляют собственные погонные жесткости сердечника и корпуса для чисто радиальных перемещений и определяются из площади поперечного сечения сердечника  $S_1$  и корпуса  $S_2$ , эквивалентного модуля упругости  $E_1$  и  $E_2$  соответственно сердечника и корпуса, а также от радиуса сердечника  $R_1$  и корпуса  $R_2$ , т.е.  $k_1 = E_1 S_1 / R_1$ ,  $k_2 = E_2 S_2 / R_2$ .

В результате для радиальных вибраций сердечника получаем

$$U_1 \cong F_0 \cdot [-4\omega^2 m_1 + k_1 + k_{r1}(k_2 + k_{r2} - 4\omega^2 m_2)] / (k_{r1} + k_{r2} + k_2 - 4\omega^2 m_2)^{-1}. \quad (10)$$

В дальнейших расчетах, согласно данным (Кислицкий и др., 1985; Петров, 1980), принимаем  $k_{r1} \approx k_{r1} \approx (5 \dots 10) \cdot 10^8$  Н/м и, согласно данным (Петров, 1977),  $k_{r2} \approx (5 \dots 10) \cdot 10^8$  Н/м и  $k_{r2} \approx 2 \cdot 10^8$  Н/м.

Оценка крутильных  $T_0$  и радиальных  $F_0$  усилий, а также двойная амплитуда (максимальное перемещение) вибраций в указанных направлениях  $2W_1, 2U_1$  представлены в табл. 1 для варианта

несимметрии – ток обратной последовательности  $i_2$ . По данным регистрации коэффициента несимметрии принимаем уровень 2 % (0.02 о.е.), который фактически не превышает в системе электроснабжения КАЗ.

Погонная тангенциальная сила  $T_0$  при токе несимметрии 0.02 о.е. составляет 668 Н/м, а амплитуда радиальной силы  $F_0 = 1040$  Н/м. Так как значения жесткости приняты в виде некоторого интервала, результаты расчетов представлены в виде диапазона изменения.

Таблица 1. Параметры вибраций элементов гидрогенератора СВ-655/110-32 мощностью 38.5 МВт при коэффициенте несимметрии 0.02

№ п/п	Параметры		Обозначение	Собственная частота	Значение
1	Крутильные колебания	амплитуда тангенциального перемещения сердечника	$2W_1$ , мкм		1.5-2.2
		абсолютная амплитуда колебаний корзины лобовых частей	$A_1$ , мкм	86 Гц	37.3-80.2
				113 Гц	21.0-45.8
2	Радиальные колебания	вибрации сердечника	$2U_1$ , мкм		0.7-0.8

Как видно из вышеприведенных расчетов, крутильные усилия и амплитуда тангенциальных вибраций в первом приближении обратно пропорциональна частоте составляющих тока несимметрии и гармоник. Тангенциальные усилия при наличии тока обратной последовательности частотой 50 Гц, при котором создаются усилия двойной частоты (100 Гц), не создают существенных вибросмещений, если собственная частота корзины лобовых частей достаточно хорошо отстроена от 100 Гц. Как видно, увеличение амплитуды собственных колебаний корзины лобовых частей происходит при собственной частоте ниже 100 Гц. В рассмотренном примере при собственной частоте 86 Гц максимальные колебания достигают 80 мкм. Условия возбуждения тангенциальных крутильных колебаний сердечника далеки от резонансных, а значения вибрации невелики – в пределах 2 мкм. Таким образом, существующая несимметрия нагрузки безопасна для гидрогенераторов.

При воздействии гармоник возникающие усилия в первом приближении можно оценить с учетом изменения частоты (обратно пропорционально квадрату частоты) и величины гармоники в относительных единицах (пропорционально величине тока в относительных единицах). Соответственно, вибрации на высших гармониках с наибольшей величиной 0.04 о.е. (11-я гармоника – 550 Гц) или 0.06 о.е. (13-я гармоника – 650 Гц) существенно снижаются.

Наложение ударных токовых воздействий от нагрузки КАЗ на генераторы можно оценить путем представления ударного воздействия током с эквивалентной частотой  $\omega_E$ . Тогда для полного тока  $I(t)$  получаем

$$I(t) = I_p \cdot \cos(\omega t) \cdot [1 + I_A \cdot e^{-t/\tau} \cdot \cos(\omega_E t + \varphi)] = I_p \cdot \cos(\omega t) + 0.5 \cdot I_p \cdot I_A \cdot e^{-t/\tau} \cdot [\cos((\omega + \omega_E)t + \varphi_1) + \cos((\omega - \omega_E)t + \varphi_2)], \quad (11)$$

где  $I_p$  и  $I_A$  – амплитуды рабочего тока и ударного тока соответственно.

Как видно, ударное действие также раскладывается на волны прямой и обратной последовательностей с частотами, отличающимися на  $2\omega_E$  и существенным увеличением амплитуды.

Для сверхнизкочастотной составляющей тока с амплитудой 100 А (оггибающая) и частотой 1.2-1.5 Гц погонная тангенциальная сила  $T_0$  составляет 1340 Н/м, а амплитуда радиальной силы  $F_0 = 2080$  Н/м.

При наложении ударных токов с амплитудой 500-750 А силовые воздействия существенно увеличиваются. Погонная тангенциальная сила  $T_0$  достигает 5040 Н/м, а амплитуда радиальной силы  $F_0$  достигает 7800 Н/м. Соответственно увеличиваются радиальные и тангенциальные смещения. Оценки ударных смещений даны в табл. 2.

Таблица 2. Параметры вибраций элементов гидрогенератора СВ-655/110-32 мощностью 38.5 МВт при наложении СНЧ составляющей тока и ударных токов

№ п/п	Параметры		Обозначение	Значение
1	Крутильные колебания	амплитуда тангенциального перемещения сердечника от СНЧ составляющей тока	$2W_1$ , мкм	4.8-8.3
		амплитуда тангенциального перемещения сердечника при ударных токах	$2W_1$ , мкм	95.2-117.0
2	Радиальные колебания	вибрации сердечника от СНЧ составляющей тока	$2U_1$ , мкм	2.8-3.2
		ударные вибрации сердечника	$2U_1$ , мкм	28.8-35.0

Рассматриваемые воздействия имеют следующие особенности.

Наложение СНЧ составляющей дает незначительное увеличение вибраций. Однако происходит смещение частоты механических воздействий, которые создают боковые частоты и опасность попадания их в окolorезонансную область. Смещение частоты тока составляет  $\pm 1.2-1.5$  Гц, вследствие чего в машине генерируются магнитные поля с частотой 48.5-49 Гц и 51.2-51 Гц. В результате взаимодействия с полем основной частоты возникают механические усилия в диапазоне частот от 98 до 102 Гц. В условиях, близких к резонансным, величины вибрации и ударные смещения  $2W_1$ ,  $2U_1$  существенно увеличиваются. Если собственная частота корзины лежит за пределами диапазона 86-113 Гц, то относительная тангенциальная вибрация лобовых частей в несимметричном режиме с СНЧ составляющими токовых нагрузок не должна превышать 15-30 мкм.

Наложение ударных токов имеет кратковременный характер. Однако величина смещения достигает 35 мкм в радиальном направлении и 117 мкм в тангенциальном направлении, т.е. превышает допустимый уровень. Для гидрогенераторов с составным сердечником вибрация его в симметричных нагрузочных режимах не должна превышать 30 мкм по ГОСТ 5616-81. Кроме того, как показали регистрации приборами "Парма" РК6.05 и измерительным комплексом, такие воздействия имеют интенсивный характер, т.е. могут повторяться несколько раз в течение минуты. Это ведет к расходованию ресурса гидротурбин и показывает причину повышенных вибраций, отмеченных при проведении контрольных и ремонтных испытаний.

### 3. Заключение

1) Анализ влияния выявленных особенностей токовых воздействий нагрузки ОАО "КАЗ" на гидрогенераторы ГЭС-3 каскада Нивских ГЭС проведен с помощью оценки крутильных усилий и тангенциальных вибраций в гидрогенераторах. Анализ вибраций от наложения токов "обратной последовательности" вследствие несимметрии нагрузки показал, что при зарегистрированном коэффициенте несимметрии менее 2 % тангенциальные усилия двойной частоты (100 Гц) не создают существенных вибросмещений, если собственная частота корзины лобовых частей достаточно хорошо отстроена от 100 Гц. Увеличение амплитуды собственных колебаний корзины лобовых частей происходит при собственной частоте ниже 100 Гц. Так, при собственной частоте 86 Гц максимальные колебания достигают 80 мкм. При возбуждении тангенциальных крутильных колебаний сердечника за областью резонансных частот значения вибрации невелики (в пределах 2 мкм).

2) Наложение СНЧ составляющей дает незначительное увеличение вибраций в радиальном направлении до 3 мкм, в тангенциальном – до 8 мкм. При этом происходит смещение частоты механических воздействий, возникновение боковых частот и увеличение опасности попадания их в около резонансную область. В условиях, близких к резонансным, величины вибрации и ударные смещения существенно увеличиваются.

3) Наложение ударных токов имеет кратковременный характер, однако величина вибросмещений превышает допустимый уровень. Такие воздействия имеют интенсивный характер, что вызывает ускорение расходования ресурса гидротурбин и необходимость частых ремонтных работ, а также объясняет причину появления повышенных вибраций, отмеченных при проведении контрольных и ремонтных испытаний.

### Литература

- Xu Shizhang.** Magnetic vibration of hydrogenerator stator core due to rotor eccentricity, rotor non-circularity and negative-sequence current. *Electra*, N 86, 1983.
- Кислицкий Б.В., Надточий В.М., Ординян Н.А.** Расчетно-экспериментальные исследования напряженного состояния стальных конструкций составного статора гидрогенераторов. *Электротехника*, № 7, 1985.
- Надточий В.М., Цветков В.А.** Силы и вибрации в гидрогенераторах при их работе в несимметричных режимах. *Электричество*, № 9, 1989.
- Петров Ю.В.** Магнитные вибрации статора гидрогенератора с оборотными частотами. *Труды ВНИИЭ*, вып.53, 1977.
- Петров Ю.В.** Собственные частоты статоров крупных гидрогенераторов. *Электротехника*, № 8, с.5-8, 1980.