

УДК 621.039, УДК 621.314

С.М. Дмитриев¹, Е.Ю. Анишев², Е.В. Рошин²

СНИЖЕНИЕ УРОВНЯ КРУТИЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ВАЛОПРОВОДОВ ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ НАСОСОВ АЭС С ЧАСТОТНОРЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Нижегородский государственный технический институт им. Р.Е. Алексеева¹,
ОАО «ОКБМ Африкантов»²

Рассмотрена возможность снижения крутильных деформаций валопровода насосов регулированием гармонического состава тока и момента асинхронного электродвигателя при питании его от преобразователя частоты и тактирования выпрямленного тока.

Ключевые слова: крутильные деформации, валопроводы, насосы, преобразователи частоты, тактирование тока.

Мощный частотнорегулируемый электропривод благодаря стремительному совершенствованию элементной полупроводниковой базы в последние годы получил главенствующее значение в силовом электроприводе, в том числе в атомной энергетике для привода главных циркуляционных насосов (ГЦН). Высоковольтные преобразователи частоты (ПЧ) существенно отличаются между собой по структурному построению и схемным решениям. Современные ПЧ решают проблемы стабилизации электромагнитного момента, формируя в асинхронном двигателе (АД) квазисинусоидальный ток и напряжение.

Благодаря топологии силовой структуры и совершенствованию системы управления ПЧ имеют функциональные возможности, позволяющие регулировать гармонический состав токов и моментов. Теоретическая часть такой коррекции гармонического состава электромагнитных величин привода была рассмотрена достаточно давно, когда силовая часть ПЧ, включая выпрямитель и инвертор, была выполнена на других, менее функциональных силовых элементах [1].

В [2, 3] было показано, что преобразователи с промежуточным контуром выпрямленного тока позволяют с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ) тактировать токи и целенаправленно использовать в токе статора АД некоторую долю высших гармоник (ВГ) и, тем самым, влиять на вращающий момент машины.

Электрически развиваемый АД вращающий момент [2]

$$m_1 = \frac{1}{1 + \sigma_2} I_m (\psi_2 \cdot i_1^*), \quad (1)$$

где σ_2 – потери рассеяния ротора; ψ_2 – потокосцепление ротора; i_1^* – ток статора.

Выпрямленный ток $i_d(t)$ промежуточного контура в общем виде изменяется по закону (рис. 1)

$$i_d(t) = I_d + \sum_{\mu=2}^{\infty} I_{d\mu} \cos(\omega_\mu t + \varphi_\mu), \quad (2)$$

где $\omega_\mu = 2\pi\mu f_N$; $I_d, I_{d\mu}$ – постоянная и переменные составляющие тока $i_d(t)$.

Используя преобразования с помощью коэффициентов ряда Фурье и выражений функции переключения фаз во временные промежутки в [2, 3] получены приближенные выражения электрически развиваемых вращающих моментов АД и их частот:

$$m_p = \begin{cases} m_1 \frac{i_{d\mu}}{I_d}, & f_p = f_{\mu\omega}; \\ \frac{m_1}{f_{n(1)}} \sqrt{\left(\frac{f_{n(6g+1)}}{6g+1} - \frac{f_{n(-(6g-1))}}{6g-1}\right)^2 + \left(\frac{f_{n(6g+1)}}{6g+1} + \frac{f_{n(-(6g-1))}}{6g-1}\right)^2} \tan^2 \varphi_2, & f_p = 6gf_1; \\ \frac{m_1}{f_{n(1)}} \frac{i_{dn}}{2I_d} \sqrt{\left(\frac{f_{n(6g+1)}}{6g+1} - \frac{f_{n(-(6g-1))}}{6g-1}\right)^2 + \left(\frac{f_{n(6g+1)}}{6g+1} + \frac{f_{n(-(6g-1))}}{6g-1}\right)^2} \tan^2 \varphi_2, & f_p = 6gf_1 \pm f_{\mu\omega}; \end{cases} \quad (3)$$

$g=1, 2, 3, \dots$

В (3) m_1 представляет амплитудное значение полезного асинхронного момента АД, создаваемый основной гармоникой статорного тока [3].

$$m_1 \approx \left(\sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d f_{n(1)} \right)^2 \frac{x_1(1-\sigma)}{2}; \quad (4)$$

$$\tan \varphi_2 = \frac{1}{\omega_{R1} T_{20}}, \quad (5)$$

где φ_2 – внутренний фазный угол между основными гармониками напряжения ротора, приведенным к статору, и током статора; T_{20} – постоянная времени роторной цепи; ω_{R1} – круговая частота системы ротора.

Крутильные колебания распределены на три группы [2]. Колебания каждой группы имеют собственную причину своего возникновения. Дополнительные крутильные колебания группы 1 ($f_p=f_{\omega\mu}$) пропорциональны моменту нагрузки, и причиной их возникновения служат колебания электрической мощности с частотой, кратной частоте питающей сети. Они не зависят от тактирования тока.

Колебания группы 2 ($f_p=6gf_1$) зависят от нагрузки статора при его тактировании. Колебания группы 3 ($f_p=6gf_1 \pm f_{\omega\mu}$) получаются в результате модуляции тока двигателя переменной составляющей тока промежуточного контура и имеют частоты, являющиеся смесью частот статора и сети.

Цель тактирования – снизить наиболее интенсивные резонансы в пределах каждой зоны тактирования до минимально возможного уровня. Влияние пульсирующего тока в промежуточном контуре постоянного тока на электромеханические характеристики привода, питаемого от инвертора, представлено на примере сравнения экспериментальных резонансных моментных характеристик в функции питающей частоты статора $m=f(f_1)$ при идеальном и сглаженном пульсирующем токе (при 5-кратном тактировании) промежуточного контура (рис. 2). Пятикратное тактирование при определенных углах коммутации позволяет минимизировать гармоники частоты сети f_1 5-го и 7-го порядка. При этом могут появиться гармоники более высокого порядка, которые в слабодемпфированных системах привода могут вызвать побочные дополнительные резонансы.

Практически все современные ПЧ включают в себя ШИМ-инверторы тока или напряжения, методики по корректировке гармонического состава ВГ сетевых и выходных электрических параметров. Применение ШИМ-инвертора тока, формирующего в асинхронном двигателе квазисинусоидальные ток и напряжение, обеспечивает отличный от каскадных приводов характер электромагнитных и электромеханических процессов.

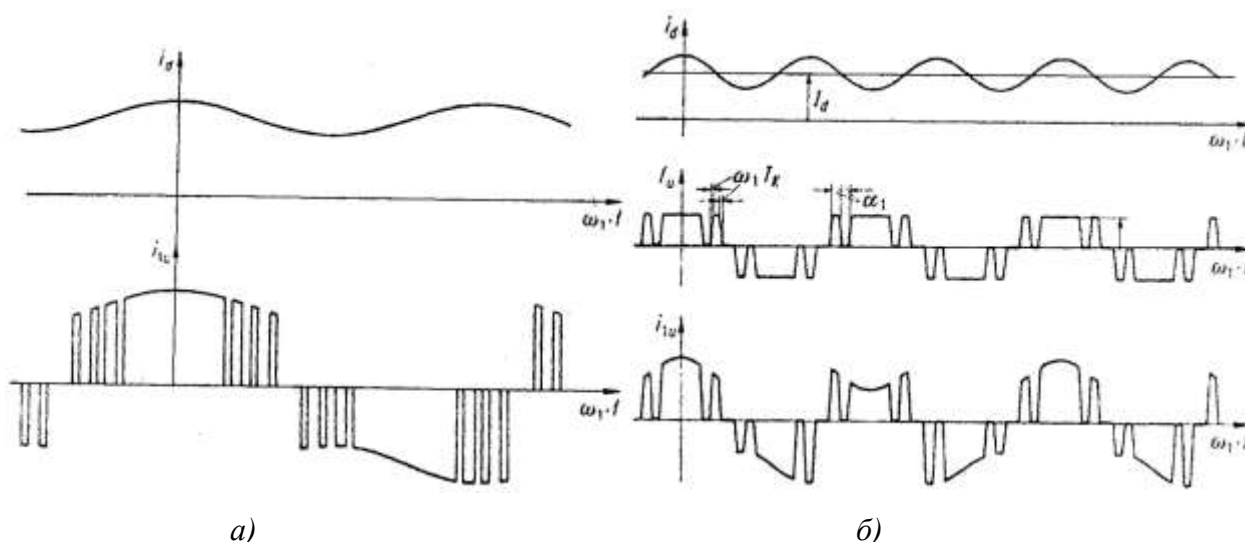


Рис. 1. Преобразование выпрямленного тока в фазные токи машины (пример) при тактировании с учетом пульсации тока в промежуточном контуре:
a – $N_p=7$; *б* – $N_p=3$

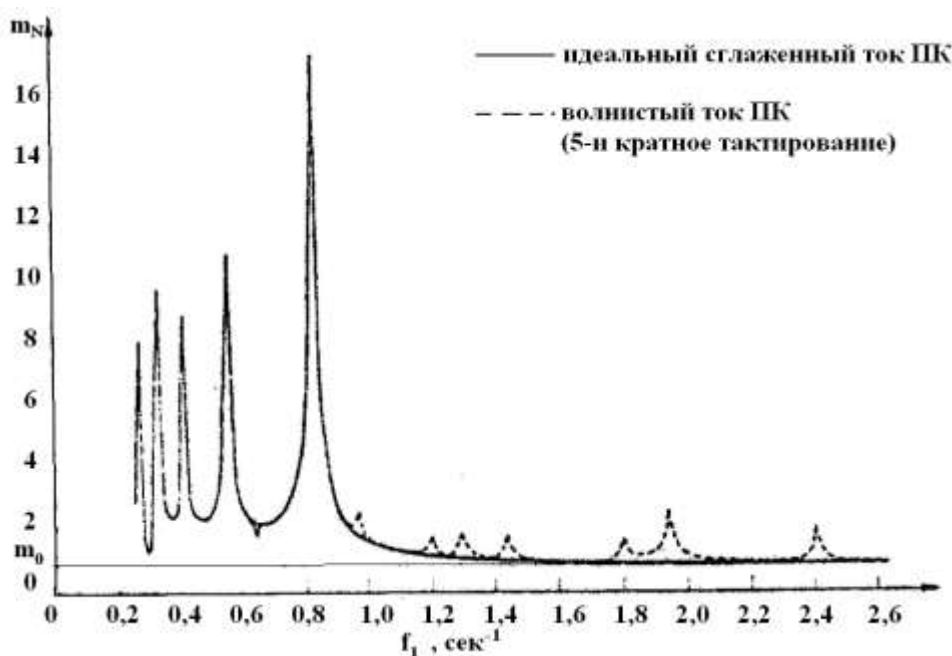


Рис. 2. Пульсации момента электромеханической 2-массовой системы с идеально сглаженными и волнистыми токами промежуточного контура

Наиболее доступные на сегодняшнем рынке технологии высоковольтной преобразовательной техники используют многообмоточный трансформатор для подавления нежелательных гармоник за счет сдвига фаз вторичных обмоток трансформатора. В зависимости от топологии привода такой трансформатор может иметь до 15 наборов вторичных обмоток.

Рассмотрим работу ПЧ с ШИМ на базе мощных регулируемых электроприводов серии PowerFlex7000 фирмы Rockwell Automation [4].

ШИМ-выпрямитель требует формирования специальной последовательности импульсов управления для переключения полностью управляемых тиристоров так, как это имеет место в инверторе. В рабочем диапазоне выходной частоты использован метод селективного исключения гармоник (SHE – Selective Harmonics Elimination) [4].

Выбирается диаграмма с определённым числом переключений на полупериод выходного тока $N_p = 5, 7, 9, 11 \dots$. Число переключений определяется в зависимости от частоты выходных токов инвертора, с учётом запрограммированной максимальной частоты модуляции. Значение максимальной частоты переключений по умолчанию 440 Гц. Число переключений на полупериод в рабочей зоне $N_p < 19$ (рис. 3, а).

Пример диаграммы проводящих состояний для каждого плеча инвертора показан на рис. 3, б. Проводящие состояния представлены в зависимости от углового положения вектора выходного тока инвертора i_M – в функции угла χ между направлением вектора i_M и осью α статора.

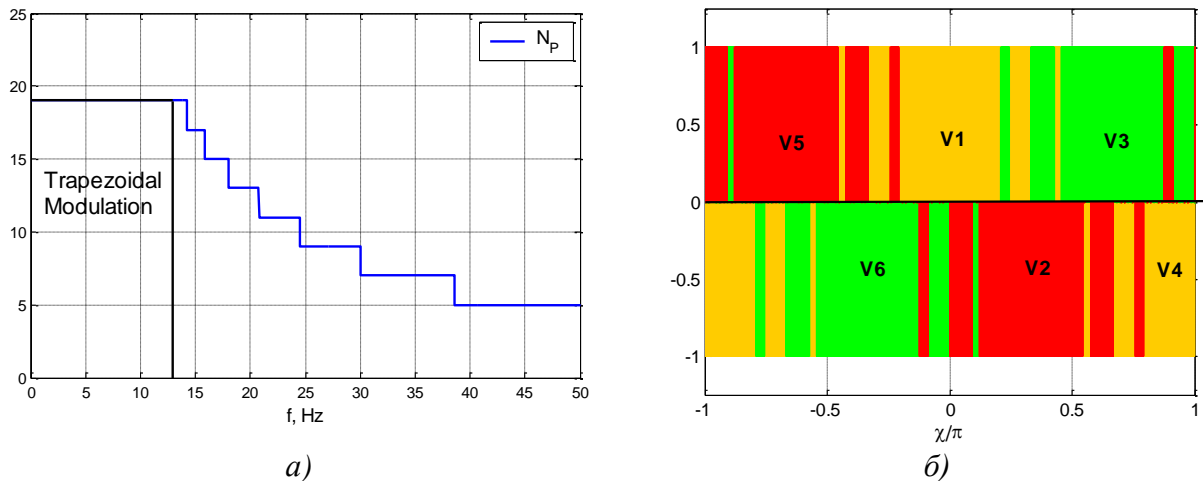


Рис. 3. Диаграмма переключений ключей инвертора:

а – по числу переключений на полупериод как функция частоты статора;

б – по проводящему состоянию плеч, $N_p = 5$

Как уже отмечалось, необходимость ограничения пульсаций электромагнитного момента определяет выбор высоковольтного ПЧ для регулирования асинхронного двигателя ГЦН, поэтому важным было исследовать пульсации электромагнитного момента двигателя 5 МВт, подключенного к автономному инвертору тока с ШИМ.

Исследования предварительно проводятся путем моделирования на виртуальном испытательном стенде. В состав стенда входит шкаф управления серийного ПЧ PowerFlex 7000. Шкаф управления соединён с компьютерной моделью силовой части электропривода. В её состав входят модели механизма, электродвигателя, силовой части ПЧ, системы электроснабжения. Компьютерная модель функционирует в реальном масштабе времени. Схема стенда представлена на рис. 4.

На вход компьютерной модели из шкафа управления поступают дискретные команды проводящего состояния для плеч ПЧ. От компьютерной модели в шкаф управления поступают аналоговые сигналы обратной связи по токам и напряжениям. Соответствие процессов виртуального стенда процессам реального электропривода подтверждено натурными исследованиями процессов на ряде конкретных объектов.

Исследования частотнорегулируемого электропривода на виртуальной модели показали:

- при периодических токах статора асинхронного двигателя в электромагнитном моменте имеют место гармоники с частотами $6 fs$, $12 fs$, в токах статора – непериодические составляющие, возникающие под действием ШИМ (рис. 5, а, б);
- наибольшая амплитуда пульсаций электромагнитного момента на валу асинхронного двигателя соответствует частоте его вращения $\omega = 0,9$ (осциллограмма на рис. 5, в);

- в диапазоне частот 0–350 Гц имеет место сплошной спектр момента. Максимумы спектра приходятся (рис. 5, з) на частоты примерно 150 Гц и 250 Гц;
- относительные амплитуды гармоник отклонения момента от среднего значения ΔM , рассчитанные с шагом по частоте $\Delta f = 0,2$ Гц, для $\omega = 0,9$ показаны на рис. 5, з.

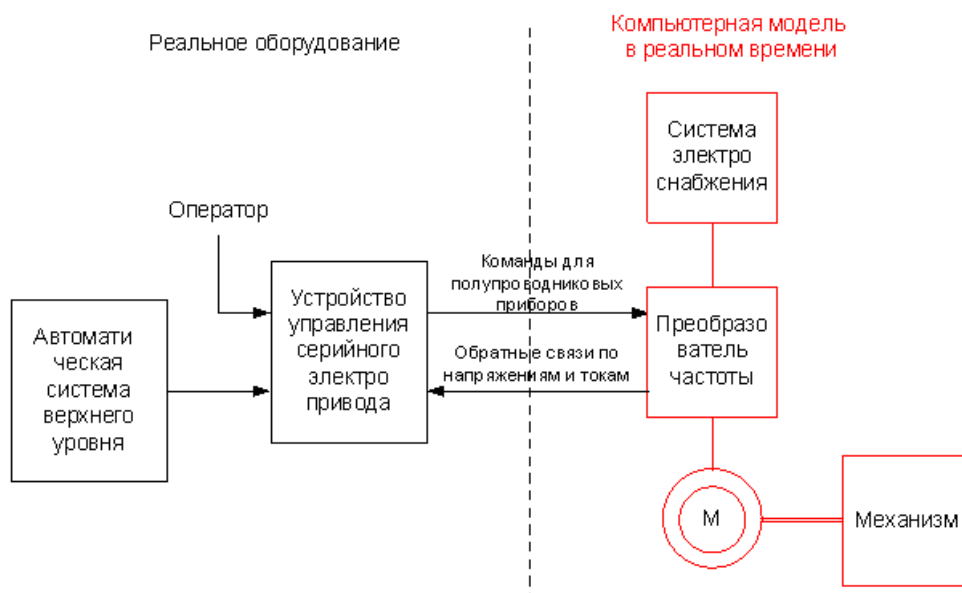


Рис. 4. Виртуальный стенд для механизмов режимов высоковольтных регулируемых электроприводов

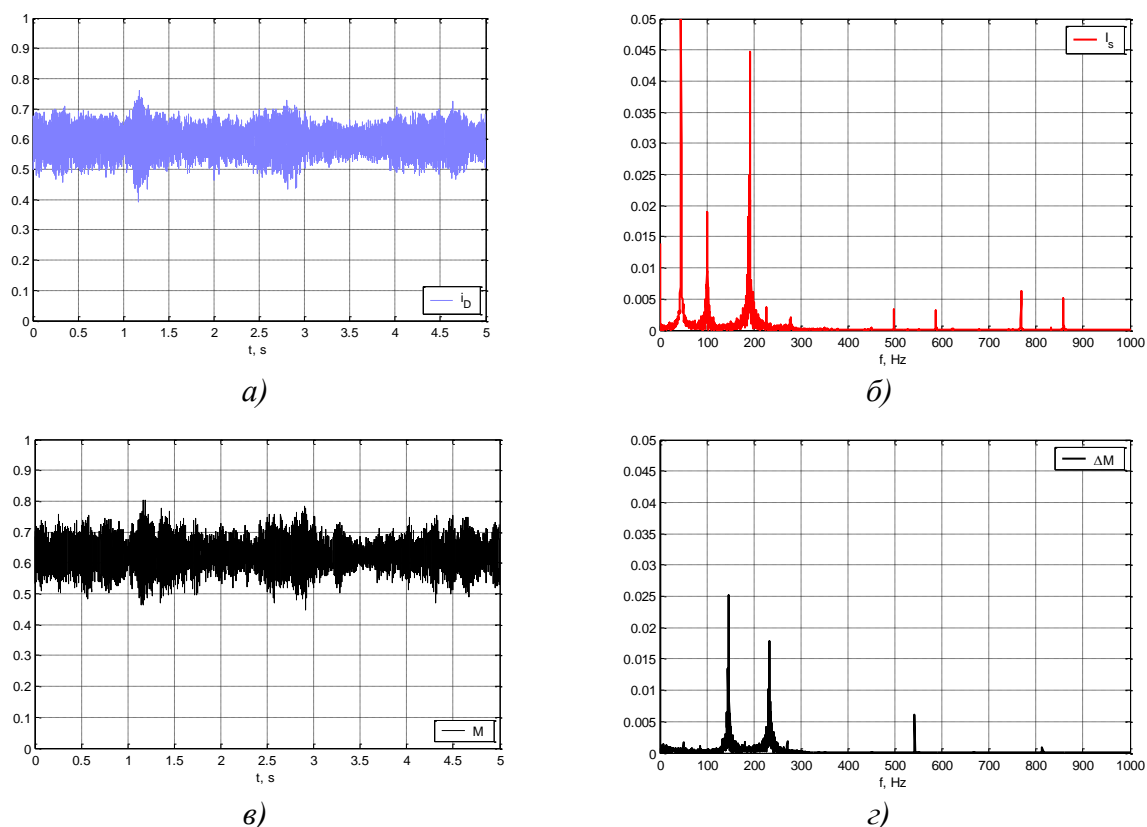


Рис. 5. К моделированию токов и моментов частотнорегулируемого электропривода ГЦН 5 МВт на частоте вращения $\omega=0,9$:
 а – выпрямленный ток; б – ток статора; в – электромагнитный момент;
 г – амплитуды гармоник отклонения момента от среднего значения

В табл. 1 приведены расчетные значения среднеквадратичных и максимальных отклонений электромагнитного момента от среднего значения, а также максимальных пульсаций момента на валу двигателя для нескольких значений частоты вращения ω .

Таблица 1

ω , о.е.	ΔM_{\max} , о.е.	$\Delta M_{M_{\max}}$, о.е.	M_{av} , о.е.
0,996	0,1	0,011	0,7452
0,99	0,12	0,013	0,7380
0,9	0,15	0,017	0,6260
0,8	0,1	0,011	0,5142

В расчетах учитывалось соотношение моментов инерции насоса и насосного агрегата в целом, показывающие, какая доля момента пульсаций передается на вал ГЦН:

$$\Delta M_M \approx (J_{\text{мех}} / J_{\Sigma}) \cdot \Delta M, \quad (6)$$

где $\Delta M = M - M_{av}$.

Как видно из табл. 1, наибольшая амплитуда пульсаций момента на валу двигателя $\Delta M_{M_{\max}} = 0,017$ имеет место при частоте вращения $\omega = 0,9$. Амплитуда пульсаций электромагнитного момента ΔM_{\max} довольно существенна - до 15 % номинального момента, однако, как показывают исследования [4], можно с большой степенью вероятности полагать, что пульсации момента такой высокой частоты вряд ли вызовут резонансные крутильные деформации вертикального валопровода ГЦН с частотнорегулируемой системой электропривода.

Для сравнения на рис. 6 показаны экспериментальные осциллограммы колебаний деформации валопровода ГЦН $\Delta \tau_{кр}$ в резонансной зоне, где частоты колебаний момента каскадного электропривода $\Delta W_{ст}$ весьма близки к собственной частоте крутильных колебаний валопровода f_m . Снижение амплитуды деформаций валопровода $\Delta \tau_{кр}$ происходит в очень узкой зоне только благодаря незначительному смещению частоты колебаний момента ($f/f_m \neq 1$). Собственные частоты тихоходных насосов главных контуров циркуляции АЭС достаточно низкие (12-35 Гц) и могут находиться в рабочем диапазоне частот вращения при плавном регулировании расхода теплоносителей [5].

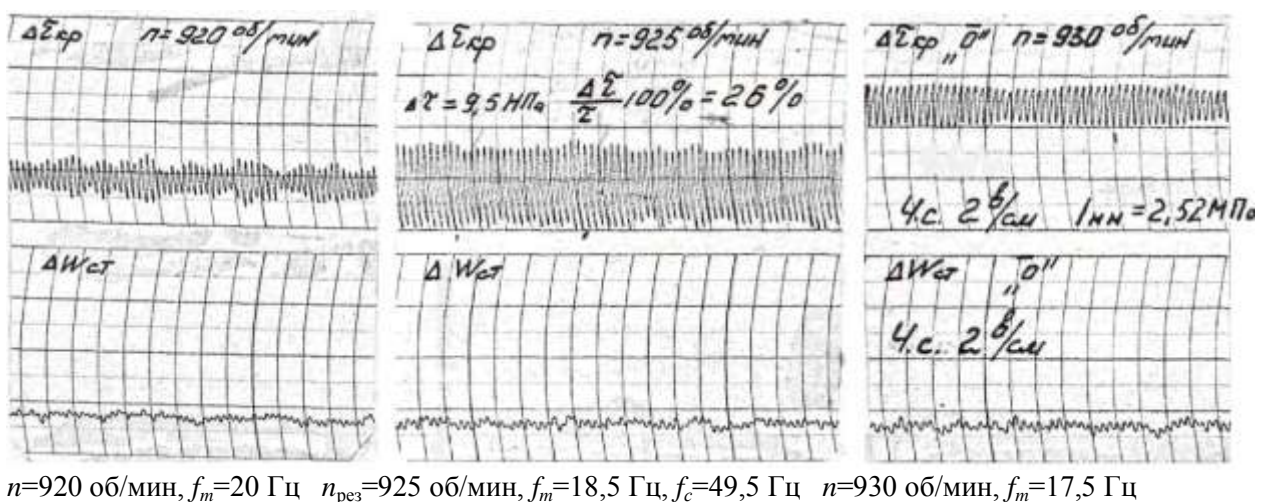


Рис. 6. Экспериментальные осциллограммы электромагнитного момента ($\Delta W_{ст}$) каскадного электропривода ГЦН 3,5 МВт и деформации валопровода ГЦН ($\Delta \tau_{кр}$) в резонансной зоне крутильных колебаний

Несмотря на проводимое моделирование на виртуальном стенде проводятся полномасштабные стендовые испытания насосов комплектно с электроприводами.

Стенды целесообразно оснастить бесконтактными тензометрическими датчиками момента, способными снять резонансные частотные характеристики. Следует максимально точно расчетно определить частоты вращения ГЦН, в которых осуществляются внутренние переключения тактовых импульсов ШИМ, чтобы проверить наличие возможного возбуждения автоколебаний в моменты изменений тактовых импульсов. Такие автоколебания возможны, если частота тактовых импульсов соизмерима и кратна собственной частоте крутильных колебаний валопровода ГЦН [3].

Следует учесть, что сервис современных ПЧ позволяет внести запретные частоты в его систему управления, чтобы по результатам предварительных расчетов или диагностики имелась возможность обходить эти запретные зоны.

Таким образом, приведенные материалы показывают теоретически и практически, что применение частотного электропривода, позволяющего использовать методы влияния на пульсации электромагнитного момента и соответственно крутильные колебания систем, можно считать одним из условий, защищающих мощные электроприводы ГЦН атомных станций от резонансов крутильных деформаций электроприводов.

Библиографический список

1. **Сандлер, А.С.** Тиристорные инверторы и широтно-импульсной модуляцией / А.С. Сандлер, Ю.М. Гусяцкий. – М.: Энергия, 1968. – 96 с.
2. **Harders, H.** Pendelmomentent – wicklung beider stromrichtergespeisten asinchron-maschine mit berücksichtigung des welligen zwischenkreisstroms / H. Harders, B.Weidemann // Archiv Elektrotechnische. Berlin. 1981. 64. N5. P. 297–305.
3. **Andresen, E.Ch.** Pendelmomente und wellenbeanspruchungen von drehstrom-käfigläufermotoren bei frequenzumrichterspeisung / E.Ch. Andresen, K. Bienick, K. Pfeiffer // ETZ Archiv, Bd4. 1982, P. 1.
4. **Анишев, Е.Ю.** «Особенности применения преобразователей частоты в мощном электроприводе циркуляционных насосов / Е.Ю. Анишев, Г.Б. Лазарев // Электротехника. 2007. №10. С. 64–68.
5. **Анишев, Е.Ю.** Резонансные крутильные колебания в электромагнитных системах «асинхронный электропривод – насос» большой мощности // Приводная техника. 2009. №1. С. 2–6.

*Дата поступления
в редакцию 26.04.2011*

S.M. Dmitriev, E.Y. Anishev, E.V. Roschin

DECREASE OF A LEVEL OF TORSION DEFORMATIONS OF SHAFTINGS OF CIRCULATING PUMPS OF THE ATOMIC POWER STATION WITH FREQUENCY REGULATION ELECTRIC DRIVE

The opportunity of decrease of torsion deformations of the shafting of pumps is observed by regulating of harmonious composition of a current and the moment of the induction motor at its feed from the frequency converter and clocking of a rectified current.

Key words: torsion deformations, shaftings, pumps, frequency converter, clocking of a current.