

УДК 621.316.717

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕГО ПУСКА И САМОЗАПУСКА ПРИВОДНОГО ДВИГАТЕЛЯ ГЛАВНОГО ЦИРКУЛЯЦИОННОГО НАСОСА АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

В.Н. Назаренко<sup>1</sup>, к.т.н., доц., К.В. Назаренко<sup>2</sup>, к.т.н.

<sup>1</sup>Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности

<sup>2</sup>Академия военно-морских сил им. П.С. Нахимова, г. Севастополь

Показана возможность снижения интенсивности колебаний в электромеханической системе “асинхронный двигатель (АД) – валопровод – рабочее колесо главного циркуляционного насоса (ГЦН)” в пусковых режимах за счет подавления знакопеременных составляющих переходного электромагнитного момента двигателя. Предложен путь ее реализации.

### Введение

На сегодняшний день часть энергоблоков АЭС Украины выработала свой ресурс эксплуатации, на очереди оставшаяся, которая приближается к этому состоянию. В связи с этим остро встает вопрос о возможности продления работы первой и обеспечение безотказного функционирования второй части энергоблоков, возникает необходимость проведения работ по модернизации, техническому перевооружению и реконструкции, направленных соответственно на продление и сохранения их ресурса.

Надежность работы АЭС во многом определяется надежностью систем охлаждения активных зон реакторов энергоблоков, в частности, исправной работой ГЦН. Важными факторами, ограничивающими ресурс ГЦН, являются последствия переходных эксплуатационных режимов: прямого пуска и самозапуска приводного асинхронного двигателя насоса. Применяемый способ непосредственного подключения электродвигателя ГЦН к сети собственных нужд энергоблока, оправданный в период проектирования и строительства АЭС, когда отсутствовали альтернативные решения, имеет, однако, ряд существенных недостатков, связанных с моментными и токовыми перегрузками, оказывающими нежелательные воздействия на двигатель, насос и питающую сеть. Моментные перегрузки приводного АД обусловлены его переходными электромагнитными моментами кратковременного действия и значительной интенсивности. Эти моменты являются источниками колебательных процессов в ГЦН, а именно: колебаний ротора двигателя; вибраций собственно насосного агрегата, системы его крепления, присоединенных к нему участков главного циркуляционного контура и вспомогательных трубопроводов; крутильных колебаний валопровода. Колебания, в свою очередь, вызывают гидродинамическую неустойчивость подшипников, разболтанность стационарных и движущихся деталей, накопление усталости в металле валопровода и других конструктивных элементах насоса, приводя к их преждевременному износу и возрастанию вероятности выхода из строя.

Теоретический анализ и поиск практических способов устранения причин колебаний в электромагнитных системах “асинхронный электропривод – исполнительный механизм” в пусковых режимах является давней научно-технической проблемой [1 - 3], не потерявшей свою актуальность и значение в наше время [4, 5]. Однако непосредст-

венно проблемам пусковых режимов приводных АД и связанным с ними особенностям эксплуатации ГЦН должного внимания уделялось мало. Общим недостатком немногочисленных исследований является отсутствие предложений по их практическому использованию, рассмотрение вопросов вне контекста продления и сохранения ресурса энергоблоков АЭС.

### **Постановка цели и задач научного исследования**

Целью работы является экспериментальное исследование приемлемого эффективного способа снижения интенсивности колебаний в электромеханической системе “АД – валопровод – рабочее колесо ГЦН” в пусковых режимах, практическое его использование и обеспечение продления и сохранения ресурса ГЦН АЭС.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить основные источники колебаний ротора асинхронного двигателя ГЦН при подключении его на напряжение сети собственных нужд станции, выбрать способ их подавления, выработать предложения по его практическому использованию;
- разработать компьютерную модель ресурсосберегающего пуска и самозапуска приводного двигателя ГЦН в среде Matlab/Simulink;
- проверить работоспособность и выполнить анализ эффективности работы устройства ресурсосберегающего пуска и самозапуска АД ГЦН на компьютерной модели.

### **Решение поставленных задач**

В результате теоретических и экспериментальных исследований [1, 3, 6, 7] установлено, что интенсивные тангенциальные колебания ротора асинхронного двигателя в пусковых режимах имеют электромагнитную природу и вызываются его установившимися и переходными моментами.

Так, при включении двигателя из неподвижного состояния ( $\omega_r = 0$ ) электромеханические колебательные процессы определяются составляющими электромагнитного момента [1]:

- установившимся (пусковым) моментом

$$M_{co} = \frac{u_s^2}{x_s} \cdot \frac{\alpha'_r(1-\sigma)}{1 + \alpha_{rs}'^2}; \quad (1)$$

- медленно затухающим знакопеременным переходным моментом

$$M_{p1} = -\frac{u_s^2}{2x_s'} \cdot \frac{1-\sigma/2}{1 + \alpha_{rs}'^2} \cdot \sin t \cdot e^{-\frac{\alpha_{rs}}{4} \cdot t}. \quad (2)$$

Начальные амплитуды переменного переходного момента (2), изменяющегося с частотой питающего напряжения, значительно превосходят установившийся момент (1).

При включении двигателя в сеть с вращающимся ротором ( $\omega_r > \omega_{rk}$ ) определяющими являются составляющие электромагнитного момента: установившийся и знакопостоянный переходный момент

$$M_{co} = \frac{u_s^2}{x_s'} \cdot \frac{(\alpha'_r - \alpha_r)}{\alpha_{rs}'^2 + s^2} \cdot s; \quad (3)$$

$$M_c = \frac{u_s^2}{x'_s} \cdot \frac{\alpha'_s(1-\sigma)}{(1+\alpha'_s)^2 \cdot (1-s)} \cdot e^{-2\alpha'_s t}; \quad (4)$$

знакопеременный переходный момент с частотой напряжения питания  $\omega = \omega_0 = 1$  (о.е.)

$$M_{pl} = -\frac{u_s^2}{x'_s} \cdot \left[ \left( \frac{\alpha'_s(1-\sigma) \cdot s}{\alpha_s'^2 + s^2} - \frac{\alpha'_s(1-\sigma)}{(1+\alpha'_s)^2 \cdot (1-s)} \right) \cdot \cos t + \right. \\ \left. + \left( \frac{\alpha_r \cdot \alpha'_r + s^2}{\alpha_s'^2 + s^2} - \frac{\alpha'_s + (1-s)}{(1+\alpha'_s)^2 \cdot (1-s)} \right) \cdot \sin t \right] \cdot e^{-\alpha'_s \cdot t} \quad (5)$$

Как следует из выражений (3) и (4), начальный результирующий знакопостоянный момент  $M_{c0} + M_c$  при включении двигателя в сеть на скорости  $\omega_r > \omega_{rk}$  всегда меньше пускового момента при включении неподвижного двигателя (1). Вследствие быстрого затухания переходных токов и магнитных потоков двигателя амплитуды знакопеременного момента (5) интенсивно убывают, не вызывая значительных и длительных колебаний ротора.

В выражениях (1)...(5):  $u_s$  – напряжение, приложенное к обмотке статора двигателя;  $\omega_r$  – угловая скорость ротора;  $\omega_{rk}$  – значение угловой скорости ротора при максимальном (критическом) моменте двигателя;  $s$  – скольжение двигателя;  $r_s$  и  $r_r$  – активные сопротивления обмоток статора и ротора соответственно;  $x_l$  – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора;  $x_s$  и  $x_r$  – индуктивные сопротивления обмоток статора и ротора соответственно;  $x_m$  – индуктивное сопротивление взаимной индукции;  $\sigma = 1 - \frac{x_m}{x_s \cdot x_r}$  – коэффициент рассеяния;  $x'_s = \frac{x_l + x_m}{\sigma}$  – переходное индуктивное сопро-

тивление обмотки статора;  $L_s = \frac{r_s}{x_s}$ ,  $L_r = \frac{r_r}{x_r}$ ,  $L'_s = \frac{L_s}{\sigma}$ ,  $L'_r = \frac{L_r}{\sigma}$  – коэффициенты затухания;  $L_{rs} = L_r + L_s$ ,  $L'_{rs} = L'_r + L'_s$ .

Источники тангенциальных колебаний ротора двигателя ГЦН при подключении его к сети аналогичны указанным в анализе выше.

Результаты вычислительного эксперимента на компьютерной модели пуска и самозапуска двигателя ГЦН ВАЗ 215/109-6АМО5 в среде Matlab/Simulink, структурная схема которой представлена на рис. 1, приводится на рис. 2.

Прямой пуск и самозапуск двигателя насоса осуществляется на холостом ходу (со свободным валом), на полное напряжение сети. Расчет параметров двигателя для моделирования его пусковых режимов выполняется в соответствии с [8].

Способы управления переходными электромагнитными моментами асинхронного двигателя достаточно разнообразны, что обусловлено связью их с угловой скоростью  $\omega$ , параметрами двигателя  $z$ , значениями и характером системы питающих напряжений  $u_s$ , а также с производными этих величин и с их начальными значениями

$$m = f \left( \omega_r; \frac{d\omega_r}{dt}; \omega_r(0); z; \frac{dz}{dt}; z(0); u_s; \frac{du_s}{dt}; u_s(0) \right). \quad (6)$$

При современном развитии науки и техники большую часть вариаций переменных в выражении (6), можно использовать для управления переходными моментами АД, добиваясь различной степени их подавления [9 - 11].

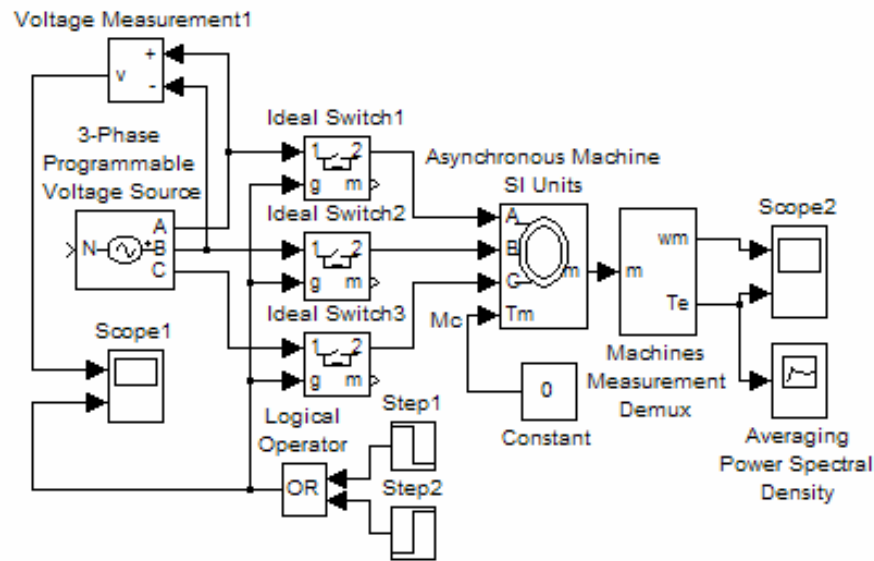


Рис. 1. Структурная схема модели пуска и самозпуска АД ВАЗ 215/109-6АМО5

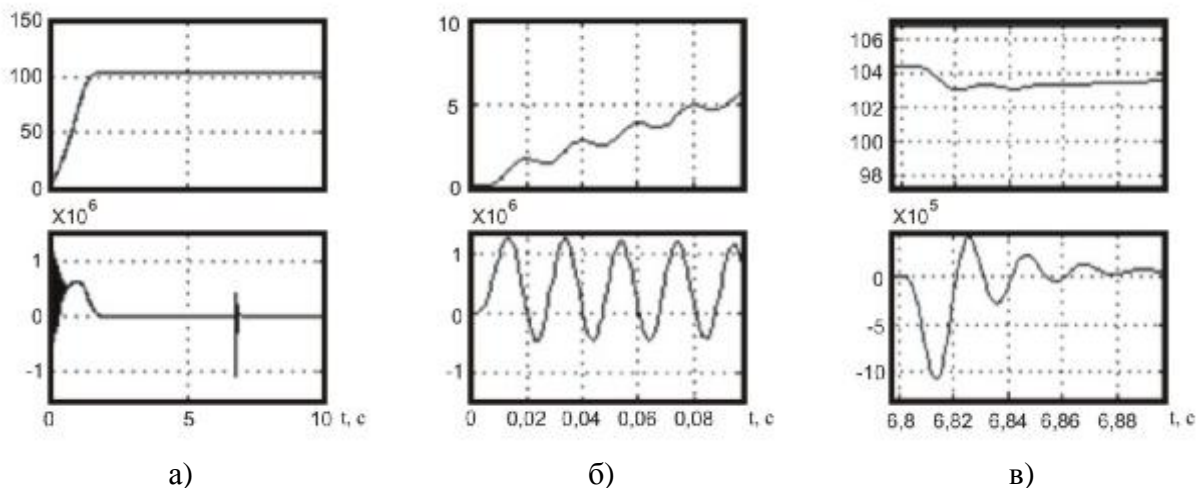


Рис. 2. Результаты моделирования пусковых режимов АД ВАЗ 215/109-6АМО5:  
 а - осциллограммы скорости вращения и момента двигателя при его прямом пуске и самозпуске после перерыва питания на 1,8 с; б - фрагмент осциллограмм скорости и момента двигателя при его прямом пуске в начальной стадии; в - фрагмент осциллограмм скорости и момента двигателя при его самозпуске

Частотный и плавный пуски, осуществляемые соответственно полупроводниковыми преобразователями частоты и пускателями плавного пуска на основе преобразователей напряжения, не могут быть рекомендованы для модернизации существующего электропривода ГЦН из-за сложности реализующих их устройств, имеющих малую надежность, неприемлемые показатели электромагнитной совместимости их с сетью собственных нужд станций и не обеспечивающих необходимую интенсивность разгона насосного агрегата.

На наш взгляд, заслуживает внимания способ пуска АД, основанный на управлении скоростью изменения магнитного потока двигателя и, следовательно, переходной составляющей тока намагничивания. Уменьшение скорости изменения магнитного потока приводит к изменению аperiodической составляющей тока намагничивания и в

конечном итоге к подавлению знакопеременных переходных электромагнитных моментов. При этом значение пускового момента двигателя остается неизменным, что не приводит к снижению быстродействия электропривода.

Предлагаемый способ безударного пуска АД предусматривает подключение его обмотки статора к сети в два этапа: первые две фазы – в максимуме линейного напряжения на этих фазах для создания в машине ненулевых магнитных условий и затем, в соответствии с условием [2]  $\Psi_s(0) = -j\dot{\Phi}_s / 2$ , – третьей фазы в момент перпендикулярности результирующего вектора напряжения  $\dot{\Phi}_s$  к результирующему вектору начального потокосцепления  $\Psi_s(0)$  (рис. 3). Условие перпендикулярности будет, следовательно, выдержано, если третью фазу обмотки подключать к фазе сети в максимуме напряжения в ней.

Рассмотренное условие пофазного подключения двигателя к сети справедливо для любой скорости вращения ротора [2]. Это позволяет подавлять знакопеременные переходные моменты как при прямом пуске двигателя ГЦН, так и его самозапуске с отключением и последующим включением его выключателя.

Для реализации рассмотренного способа подключения АД ГЦН к сети собственных нужд с подавлением переходных моментов предлагается устройство ресурсосберегающего пуска и самозапуска двигателя. Принципиальная электрическая схема устройства представлена на рис. 4.

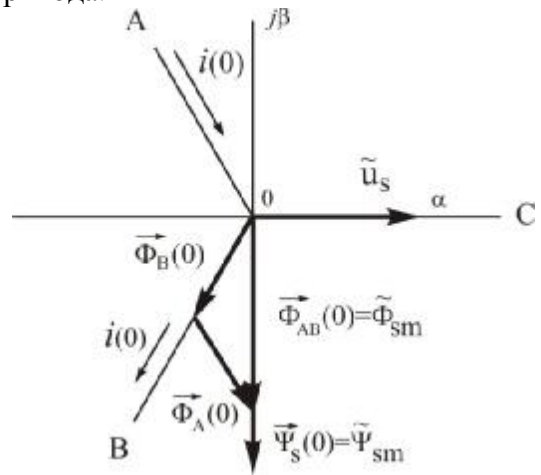


Рис. 3. Результирующие векторы напряжения и потокосцепления АД в момент подключения его к сети

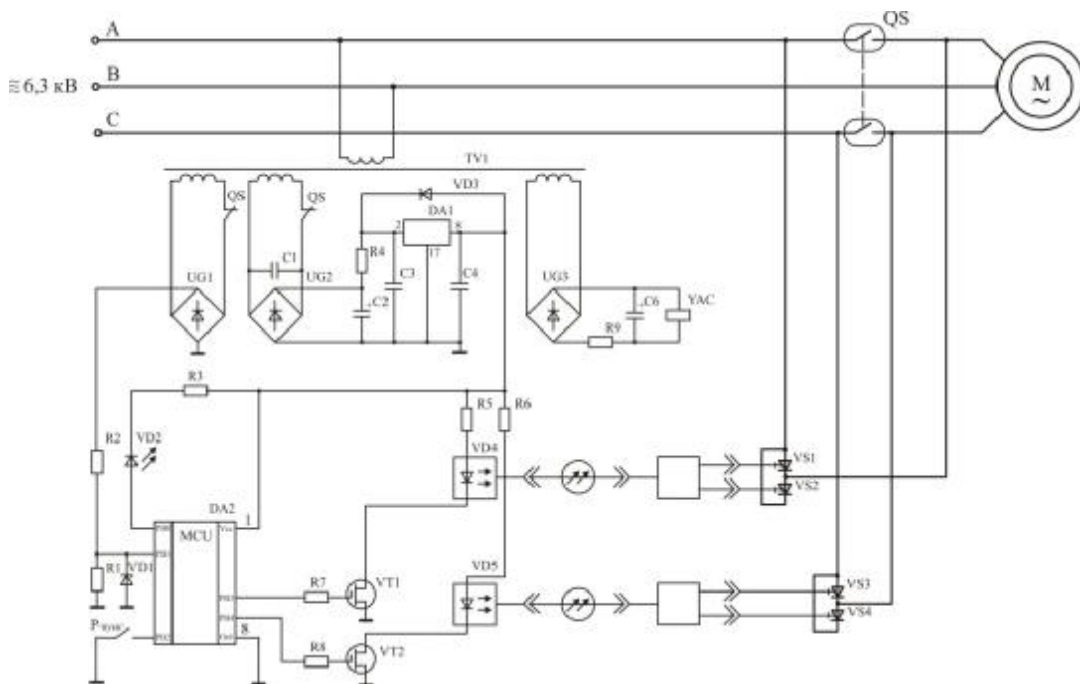


Рис. 4. Схема электрическая принципиальная устройства ресурсосберегающего пуска и самозапуска двигателя ГЦН

Основу модуля управления устройства подключения АД ГЦН к сети составляет программируемый микроконтроллер DA2. Поэтапное подключение обмотки статора двигателя к сети осуществляется встречно-параллельно включенными тиристорами с оптическим управлением (фототиристорами) VS1-VS2, VS3-VS4. Опорным для работы программы микроконтроллера является выпрямленное линейное напряжение  $U_{AB}$ . После прохождения сигнала “включить” по каналам штатной электрической схемы управления выключателем двигателя Q (для выключателя ВЭ-6 – блоки БУД-У и БКЛ-М) и его включения микроконтроллер формирует на своих цифровых выходах РВ3 и РВ4 сигналы включения фототиристоров. Электрические сигналы управления предварительно усиливаются транзисторами VT1 и VT2 и преобразуются лазерными диодами VD4, VD5 в световые.

По той причине, что быстродействие устройства ресурсосберегающего пуска и самозапуска двигателя ГЦН значительно превышает быстродействие вакуумного контактора, двигатель подключается к сети с подавлением переходных моментов. Фототиристоры устройства после завершения пускового режима двигателя и включения контактора QS шунтируются его одноименными главными контактами, а само устройство отключается вспомогательными контактами.

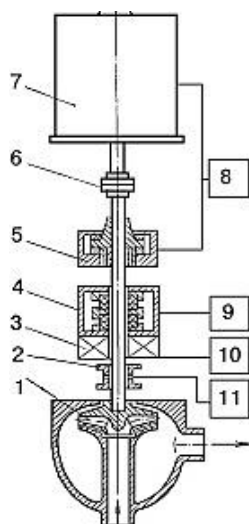


Рис. 5. Типовая структурная схема ГЦН-195М

Важнейшим этапом моделирования на ПЭВМ, который предшествует исследованию колебательных процессов, происходящих в реальной электромеханической системе насосного агрегата ГЦН, является схематизация этой системы. Электромеханическая схема ГЦН, включающая в себя приводной асинхронный двигатель с маховиком, валопровод с конструктивными элементами, рабочее колесо насоса, имеет достаточно сложное устройство. Типовая структурная схема насосного агрегата ГЦН-195М представлена на рис. 5.

На рис. 5: 1 – рабочее колесо насоса; 2 – нижний радиальный подшипник; 3 – холодильник корпуса уплотнения вала; 4 – блок уплотнения вала; 5 – радиально-осевой подшипник; 6 – соединительная муфта; 7 – электродвигатель с маховиком; 8 - 11 – вспомогательные системы, обеспечивающие работу агрегата.

Механическую часть рассматриваемой электромеханической системы (механическую подсистему) ГЦН-195М для определения упругих моментов, передаваемых валопроводом, можно рассматривать как трехмассовую крутильную систему. Другими словами, сложную многомассовую механическую подсистему ГЦН путем упрощенного метода редуцирования, заключающегося в выделении в валопроводе элементов, имеющих наибольшие моменты инерции вместе с примыкающими к ним деталями и участками валов, представляют в виде трех сосредоточенных масс: ротора электродвигателя с маховиком; вращающихся узлов опорно-упорного подшипника и механического уплотнения вала насоса; рабочего колеса насоса. Предполагается, что в расчетной трехмассовой крутильной системе отсутствуют зазоры и сопротивления, пропорциональные скорости деформации.

С учетом этого трехмассовая система может быть представлена в виде системы уравнений [12]:

$$\left. \begin{aligned} p\omega_1 J_1 &= M - M_{12}, \\ p\omega_2 J_2 &= M_{12} - M_{23}, \\ p\omega_3 J_3 &= M_{23} - M_C, \\ pM_{12} &= C_{12}(\omega_1 - \omega_2), \\ pM_{23} &= C_{23}(\omega_2 - \omega_3), \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где  $p$  – оператор дифференцирования;

$\omega_1, \omega_2, \omega_3$  – угловые скорости масс системы;

$J_1, J_2, J_3$  – моменты инерции масс системы;

$M$  – вращающий момент электродвигателя;

$M_C$  – момент сопротивления, действующий на систему;

$M_{12}, M_{23}$  – упругие моменты в сечениях на участках валопровода, примыкающих ко второй и третьей массам;

$C_{12}, C_{23}$  – коэффициенты жесткости валов между соответствующими массами системы.

Из системы уравнений (7) видно, что данная механическая подсистема состоит из пяти динамических звеньев, выходными величинами которых являются угловые скорости первой, второй и третьей масс и упругие моменты в соответствующих сечениях на участках валопровода. Формирование упругих моментов осуществляется в результате разности угловых скоростей первой и второй, второй и третьей масс.

Структурная схема трехмассовой системы представлена на рис. 6.

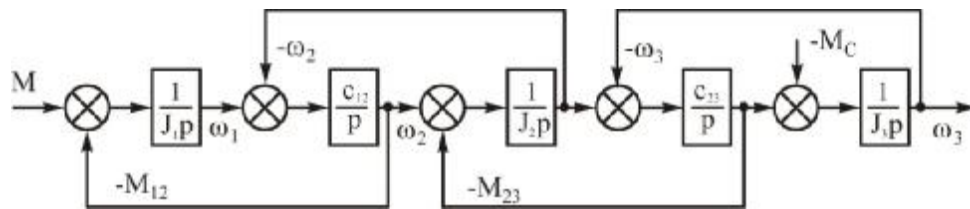


Рис. 6. Структурная схема трехмассовой системы

Структурная схема компьютерной модели ресурсосберегающего пуска и самозапуска приводного двигателя ГЦН-195М в среде Matlab/Simulink может быть получена путем добавления в структурную схему модели его пуска и самозапуска (см. рис. 1) блоков, моделирующих создание в пусковых режимах двигателя ненулевых начальных магнитных условий: Relational Operator; Trigger Subsystem; Date Type Conversion; Constant 1[0], блоков, моделирующих вентиляторный статический момент нагрузки насоса: Math Function[ $u^2$ ]; Product 1; Product 2; Constant 2 [ $M_0$ ]; Constant 3 [ $M_{сн}$ ]; Constant 4 [ $W_n$ ]; Sum 1; Sum 2 и блоков, моделирующих механическую часть электромагнитной системы “АД – валопровод – рабочее колесо ГЦН”: Transfer Fcn 1 [ $C_{12}/s$ ]; Transfer Fcn 2 [ $1/J_2s$ ]; Transfer Fcn [ $C_{23}/s$ ]; Transfer Fcn 4 [ $1/J_3s$ ]; Sum 3; Sum 4; Sum 5; Sum 6.

Структурная схема модели ресурсосберегающего пуска и самозапуска приводного двигателя ГЦН-195М представлена на рис. 7.

Параметры окон настройки для функциональных блоков структурной схемы модели (см. рис. 7) получены расчетным путем и соответствуют каталожным данным реальной конструкции насосного агрегата ГЦН-195М, условиям его эксплуатации [13].

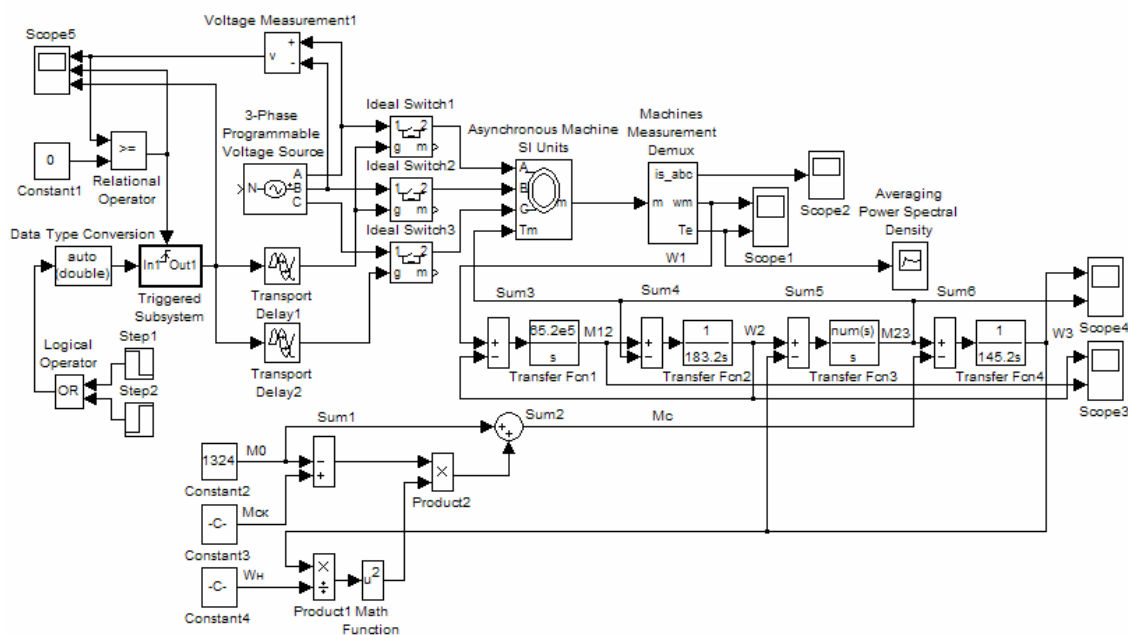


Рис. 7. Структурная схема модели ресурсосберегающего пуска и самозапуска АД ВАЗ 215/109-6АМО5

Результаты вычислительных экспериментов на компьютерной модели, структурная схема которой представлена на рис. 7, приведены на спектрограммах (рис. 8) и осциллограммах (рис. 9, 10).

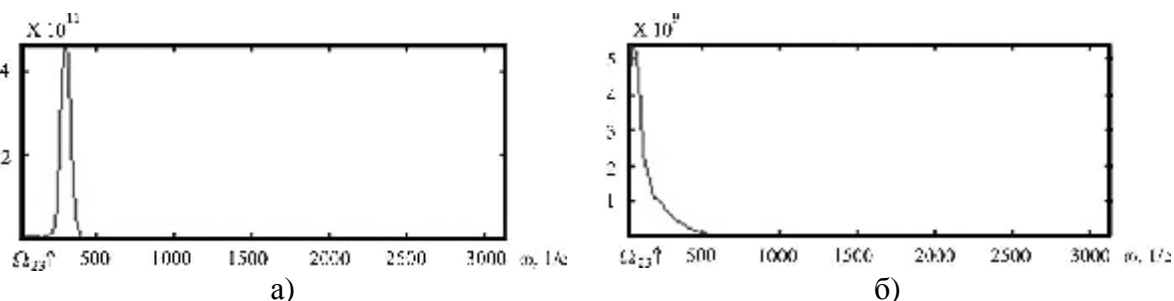


Рис. 8. Спектры мощности переходного момента двигателя ВАЗ 215/109-6АМО5 в пусковых режимах: а - при прямом пуске; б - при безударном пуске

Спектры мощности (см. рис. 8), полученные в окне виртуального анализатора Averaging Power Spectral Density, позволяют провести анализ гармонического состава переходного электромагнитного момента приводного двигателя ГЦН-195М при его прямом (см. рис. 8, а) и безударном (см. рис. 8, б) пусках.

Спектральная плотность переходного электромагнитного момента двигателя на частоте, равной расчетному значению собственной частоты крутильных колебаний в электромеханической системе “АД – валопровод – рабочее колесо ГЦН”  $\Omega_{23} = 138,4$  1/с, при прямом пуске (см. рис. 8, а) на порядок превосходит по величине плотность при безударном пуске (см. рис. 8, б) ( $15 \cdot 10^9$  и  $1,5 \cdot 10^9$  соответственно), чем объясняется существенное снижение уровня упругих моментов на участках валопровода ГЦН-195М при безударном пуске (см. рис. 10, а и рис. 10, г) по сравнению с прямым пуском АД (см. рис. 9, в и рис. 9, г).



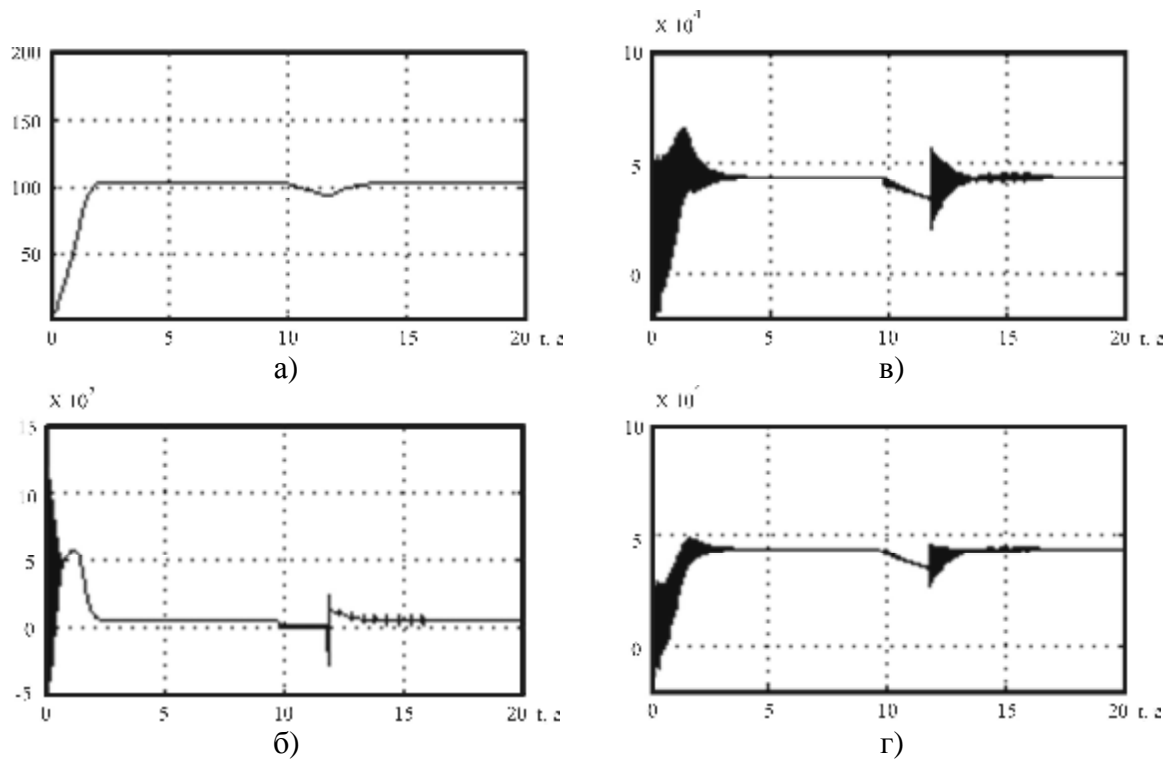


Рис. 9. Осциллограммы: а - скорости вращения АД; б - электромагнитного момента АД; в, г - упругих моментов на участках валопровода ГЦН-195М  $M_{12}$ ,  $M_{23}$  при прямом пуске и самозапуске приводного двигателя ВАЗ 215/109-6АМО5

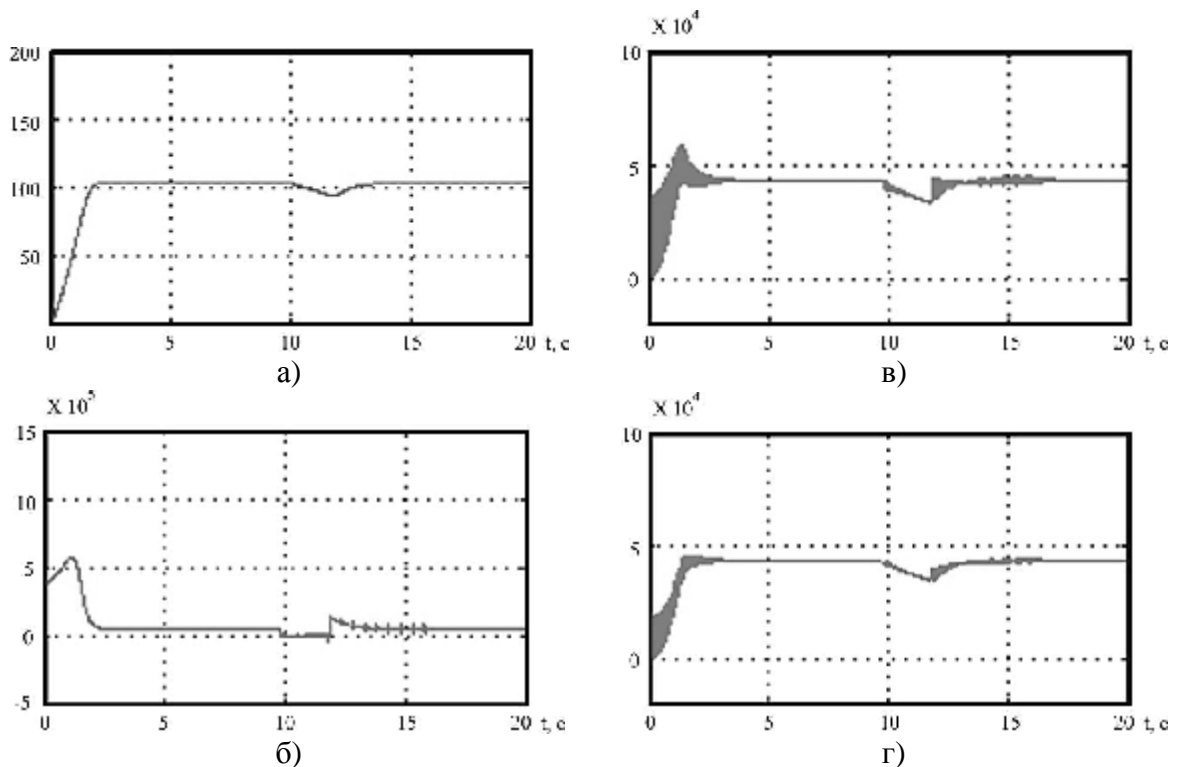


Рис. 10. Осциллограммы: а - скорости вращения АД; б - электромагнитного момента АД; в, г - упругих моментов на участках валопровода ГЦН-195М  $M_{12}$ ,  $M_{23}$  при безударном пуске и самозапуске приводного двигателя ВАЗ 215/109-6АМО5

### Выводы

1. На основе приведенного аналитического анализа электромагнитного состояния приводного асинхронного двигателя и полученных результатов вычислительных экспериментов при моделировании его пусковых режимов в среде Matlab показано, что основным источником интенсивных колебательных процессов в электромеханической системе “АД – валопровод – рабочее колесо ГЦН” являются переходные электромагнитные моменты АД.

2. Предложен способ снижения интенсивности колебаний в электромеханической системе “АД – валопровод – рабочее колесо ГЦН” при пуске и самозапуске двигателя за счет создания в нем ненулевых начальных магнитных условий и подавления знакопеременного переходного электромагнитного момента с одновременным сохранением быстродействия электропривода.

3. Разработана электрическая схема устройства ресурсосберегающего пуска и самозапуска приводного двигателя ГЦН-195М.

4. Предложена схема модернизации штатного электропривода ГЦН-195М путем применения устройства ресурсосберегающего пуска и самозапуска приводного двигателя.

5. Разработана компьютерная модель ресурсосберегающего пуска и самозапуска двигателя ГЦН-195М в среде Matlab/Simulink.

6. На модели проверена работоспособность алгоритма работы устройства ресурсосберегающего пуска и самозапуска ГЦН-195М, выполнен анализ эффективности его работы.

### ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РЕСУРСООЩАДНОГО ПУСКУ І САМОЗАПУСКУ ПРИВІДНОГО ДВИГУНА ГОЛОВНОГО ЦИРКУЛЯЦІЙНОГО НАСОСА АТОМНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

**В.М. Назаренко, К.В. Назаренко**

Показано можливість зниження інтенсивності коливань в електромеханічній системі "асинхронний двигун – валопровід - робоче колесо головного циркуляційного насоса" в пускових режимах за рахунок придушення знакозмінних складових перехідного електромагнітного моменту двигуна. Запропоновано шлях її реалізації.

### PROVIDING of RESOURCE-ECONOMY STARTING AND SELF-STARTING of DRIVING ENGINE of MAIN CIRCULATION PUMP of NUCLEAR POWER PLANT

**V. Nazarenko, K. Nazarenko**

The possibility to reduce the fluctuations intensity in the electromechanical system "asynchronous motor - shafting - main coolant pump impeller" in the starting conditions by suppressing of the alternating-sign components of the transition electromagnetic motor moment has been shown. Its realization way was suggested.

### Список использованных источников

1. *Казовский Е.Я.* Переходные процессы в электрических машинах переменного тока / Е.Я. Казовский. – М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1962. – 624 с.

2. *Петров Л.П.* Управление пуском и торможением асинхронных двигателей / Л.П. Петров. – М.: Энергоиздат, 1981. –184 с.

3. *Чабан В.И.* Методы анализа электромеханических систем / В.И. Чабан. – Львов: Вища школа, 1985. – 192 с.

4. *Калинов А.П.* Исследование эффективности формирования пусковых режимов асинхронного двигателя / А.П. Калинов, М.Ю. Юхименко, С.В. Исаев // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчуг: КГПУ ім. Михайла Остроградського. 2007. – № 2 (2). – С. 15 - 21.

5. Назаренко В.Н. Уточнение условий подключения к сети обмоток статора асинхронного двигателя при его безударном пуске / В.Н. Назаренко, К.В. Назаренко, К.П. Путилин // Зб. наук. пр. АВМС ім. П.С. Нахімова. – Севастополь: АВМС ім. П.С. Нахімова, 2011. – Вип. 1 (5). – С. 146 - 151.
6. Каноненко Е.В. Электрические машины / Е.В. Каноненко, Г.А. Сипайлов, К.А. Хорьков. – М.: Высшая школа, 1975. – 279 с.
7. Путилин К.П. Вибрация при пуске асинхронного двигателя / К.П. Путилин, В.Н. Назаренко, М.Ф. Манюков // Межведомств. сборник научн. трудов. – М.: МЭИ, 1989. – С. 55 - 63.
8. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystem и Simulink / И.В. Черных. – М.: Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
9. Сабинин Ю.А. Частотно-регулируемые асинхронные электроприводы / Ю.А. Сабинин, В.Л. Грузов. – Л.: Энергоиздат, 1975. – 128 с.
10. Петров Л.П. Тиристорные преобразователи напряжения для асинхронного электропривода / Л.П. Петров [и др.]. – М.: Энергоиздат, 1986. – 200 с.
11. Путилін К.П. До питання вирішення проблеми обмеження віброактивності асинхронних приводів корабельних механізмів при здійсненні їх пуску / К.П. Путилін, В.М. Назаренко, К.В. Назаренко // Сб. науч. тр. СІЯЕіП. – Севастополь: СІЯЕіП, 2001. – Вип. 5. – С. 136 - 139.
12. Яблонский А.А. Курс теоретической механики / А.А. Яблонский. – М.: Высшая школа, 1971. – Ч. II. – 476 с.
13. Основное оборудование реакторного отделения. Главный циркуляционный насос ГЦН-195М. [Электронный ресурс]. – М.: Министерство Российской Федерации по атомной энергии. Концерн «Росэнергоатом». Балаковская АЭС. Служба подготовки персонала. – 187 с. - Режим доступа: <http://bib.convdocs.org/v10948/?cc=1&view=pdf>.

Надійшла до редакції 19.11.2013 р.

УДК 621.039.586

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ АВАРИЙНЫХ ПРОЦЕССОВ В РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКЕ С ВВЭР-1000 ПУТЕМ ВНЕДРЕНИЯ КВАЗИ-ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ ВНУТРИКОРПУСНЫХ УСТРОЙСТВ РЕАКТОРА**

**Д.Н. Скуляр<sup>1</sup>, асп., Д.В. Шевелев<sup>2</sup>, к.т.н.**

<sup>1</sup>ГП НАЭК «Энергоатом» ОП «Южно-Украинская АЭС»

<sup>2</sup>ГП НАЭК «Энергоатом» ОП «Научно-технический центр»

Служба научно-технической поддержки в г. Севастополе

Производится предварительная оценка улучшения реалистичности и углубления детализации моделирования теплофизических процессов в ядерной энергетической установке с ВВЭР-1000 при внедрении квази-трехмерной модели реактора. Приводятся результаты сравнительного расчетного исследования аварийного процесса с помощью одномерной модели и квази-трехмерной модели внутрикорпусных устройств реактора.