

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЧАСТОТНОГО ПУСКА ГИДРОАГРЕГАТА ГИДРОАККУМУЛИРУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ В НАСОСНОМ РЕЖИМЕ

*Выполнен анализ существующих способов пуска гидроагрегатов в насосном режиме на гидроаккумулирующих электростанциях (ГАЭС). Усовершенствован частотный способ пуска гидроагрегата в насосном режиме от соседнего гидроагрегата, работающего в генераторном режиме. Разработана математическая модель усовершенствованного способа данного пуска гидроагрегата. На основе указанной математической модели создана имитационная компьютерная модель, посредством которой исследованы электромагнитные и механические процессы частотного пуска применительно к гидроагрегатам, установленным на Киевской ГАЭС.*

**Ключевые слова:** гидроагрегат, пуск, насосный режим, система автоматического управления, моделирование электромеханических процессов.

В последние годы в Украине и во всем мире уделяется большое внимание строительству новых гидроаккумулирующих электростанций (ГАЭС) или вводу дополнительных мощностей на действующих из них. Это обусловлено острой потребностью энергосистем всех стран в компенсации пиковых значений потребляемых и генерируемых электрических мощностей, которая осуществляется посредством ГАЭС. Однако до настоящего времени остаются недостаточно исследованными и несовершенными режимы плавного пуска гидроагрегатов ГАЭС в насосном режиме.

При этом на практике на ныне действующих отечественных и зарубежных ГАЭС используются разнообразные способы пуска гидроагрегатов (ГА) в насосном режиме, но всем известным способам присущи свои достоинства и недостатки. В частности, при наиболее технически простом способе прямого асинхронного пуска (без возбуждения) возникают огромные пусковые токи, приводящие к преждевременному износу ГА и ухудшению качества напряжения энергосистемы [1, 2]. При использовании реакторного или трансформаторного способов асинхронного пуска удается примерно в два раза уменьшить пусковые токи ГА и продлить за счет этого сроки их эксплуатации, но при этом увеличивается продолжительность пуска ГА и одновременно требуется установка дополнительного пускового электрооборудования (реакторов, шунтирующих выключателей, автотрансформаторов) [3].

При способе пуска ГА с использованием дополнительного разгонного двигателя в качестве последнего обычно применяется асинхронный двигатель с фазным ротором, соединенный своим валом с валом ГА. При этом разгонный двигатель пускается от сети с применением реостата или выпрямителя, подсоединяемых в цепь обмотки ротора [4]. Мощность разгонного двигателя обычно не превышает 10% от установленной мощности пускаемого ГА [4]. Наряду с технической эффективнос-

тью способа пуска ГА с использованием дополнительного разгонного двигателя, этому способу присущ недостаток, связанный с необходимостью установки дополнительной (разгонной) электрической машины, которая требуется только для осуществления пуска ГА в насосном режиме (а всё остальное время в ней нет необходимости). В некоторых случаях в качестве разгонного двигателя может быть использован электромашинный возбудитель или дополнительный синхронный генератор, установленный на валу гидроагрегата [4].

В последнее время для пуска ГА в насосном режиме всё чаще стал применяться частотный способ управления, который на практике осуществляется в двух видах: от статического преобразователя частоты (СПЧ) или от соседнего гидрогенератора, установленного на данной ГАЭС. Первый из упомянутых вид реализации частотного пуска позволяет обеспечить минимальные пусковые токи, увеличить сроки службы ГА в эксплуатации и минимизировать влияние пускового режима гидроагрегата на качество сетевого напряжения. Однако этому способу присущ такой существенный недостаток, как высокая стоимость СПЧ (который функционирует фактически только при пуске ГА в насосном режиме).

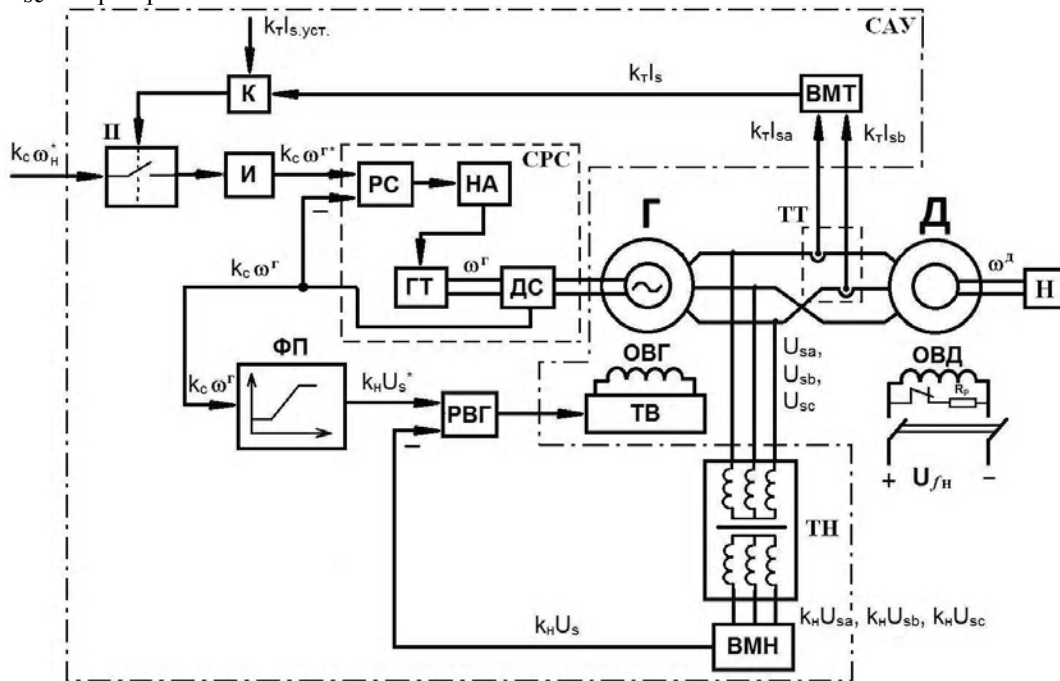
При втором (более дешевом) виде реализации частотного управления ГА при пуске не требуется применение СПЧ, так как его функцию выполняет один из соседних гидроагрегатов ГАЭС, работающий в генераторном режиме с переменными частотой и амплитудой статорных напряжений. Этот вид частотного пуска за рубежом называют «back-to-back», что в переводе с английского языка означает «спина к спине» [4–6]. Несмотря на то, что использование последнего способа реализации частотного управления в последние годы расширяется, широкое его применение сдерживается происходящими при этом способе заметными бросками пускового тока и колебаниями электромагнитного момента ГА, которые на практике приводят к преждевременному износу последнего и ухудшают качество напряжения энергосистемы [5, 7].

Цель предлагаемой статьи – совершенствование частотного пуска гидроагрегата в насосном режиме способом от соседнего ГА и исследование методом компьютерного моделирования полученных при этом электро-механических процессов.

На рис. 1 приведена функциональная схема частотного пуска синхронного двигателя Д в насосном режиме от синхронного генератора Г соседнего гидроагрегата. В данной схеме фазные статорные обмотки синхронных машин (СМ), работающих в режиме генератора Г и двигателя Д, соединены между собой. При пуске посредством системы автоматического управления (САУ) плавно открывается направляющий аппарат НА, постепенно увеличивая расход воды через гидротурбину ГТ и обеспечивая этим плавное (близкое к линейному закону) изменение ее скорости  $\omega^Г$  (а также механически связанного с ней генератора Г) от нуля до номинального (синхронного) значения  $\omega^Н$ . С помощью пропорционально-интегрального-дифференциального регулятора возбуждения генератора РВГ (воздействующего через тиристорный возбудитель ТВ на обмотку возбуждения генератора ОВГ) осуществляется примерно прямо пропорционально скорости  $\omega^Г$  генератора Г изменение частоты фазных статорных напряжений  $U_{sa}, U_{sb}, U_{sc}$  генератора Г.

На первом этапе предложено (в отличие от известных схем реализации частотного управления от соседнего ГА) в схеме на рис. 1: во-первых, начальное (перед пуском в течение 20 с на частоте, равной 1,5 Гц) насыщение магнитным потоком двигателя Д, что достигается путем задания от функционального преобразователя ФП минимального ограничения амплитуды фазного напряжения генератора Г (на уровне 3% от его номинального напряжения). Во-вторых, – предложена автоматическая корректировка изменения скорости генератора Г (достигаемая с помощью компаратора К, прерывателя П и интегратора И), за счет которой обеспечивается ограничение пусковых статорных токов генератора Г и двигателя Д (на уровне  $I_s$ , уст, не превышающем двукратного от номинального значения токов для этих СМ) и одновременно бросков указанных токов и электромагнитного момента двигателя Д в режиме пуска.

При этом мгновенные значения модулей  $U_s$  и  $I_s$  статорных напряжений и токов  $I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}$  синхронных машин Г и Д предложено определять посредством вычислителей модуля напряжения ВМН и модуля тока ВМТ из соотношений [8, 9]:



**Рисунок 1** – Функциональная схема системы автоматического управления частотным пуском синхронного двигателя от соседнего гидроагрегата ГАЭС

(Г – синхронный генератор; Д – синхронный двигатель; ГТ – гидротурбина; Н – насос; НА – направляющий аппарат; ОВГ – обмотка возбуждения генератора; ТВ – тиристорный возбудитель; ОВД – обмотка возбуждения двигателя; ТН – измерительный трансформатор напряжения; ТТ – измерительные трансформаторы тока; ВМН – вычислитель модуля напряжения; ВМТ – вычислитель модуля тока; СРС – система регулирования скорости; РС – регулятор скорости; РВГ – регулятор возбуждения генератора; К – компаратор; П – прерыватель; И – интегратор; ДС – датчик скорости; ФП – функциональный преобразователь;  $R_p$  – разрядный резистор;  $k_T, k_H, k_C$  – передаточные коэффициенты датчиков тока, напряжения и скорости соответственно)

$$\left. \begin{aligned} U_s &= [(U_{sa})^2 + (U_{sb} - U_{sc})^2 / 3]^{1/2}, \\ I_s &= [(I_{sa})^2 + (I_{sa} + 2I_{sb})^2 / 3]^{1/2} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

в результате чего повышаются быстродействие и точность этих измерений.

На *втором этапе* разработана математическая модель электротехнического комплекса с САУ, показанной схемой на рис. 1. Заданы общепринятые исходные допущения при математическом описании трехфазных СМ [8]:

- фазные статорные обмотки симметричны и одинаковы;
- пространственное распределение магнитных полей фазных статорных обмоток – синусоидальное;
- не учитываются электромагнитные потери в стали, вызванные перемагничиванием сердечника и вихревыми токами;
- воздушный зазор между статором и ротором полагается равномерным;
- не учитывается нелинейность кривой намагничивания машины.

Указанные допущения соответствуют математической модели СМ, которая выполнена во вращающейся ортогональной системе «d–q» с использованием общепринятой системы относительных единиц [10]. Принимая во внимание идентичность параметров синхронных машин Г и Д и исходя из равенства соответствующих

проекций статорных напряжений этих машин (при пренебрежении малыми падениями напряжений на кабелях, соединяющих их статорные обмотки):

$$\left. \begin{aligned} u_d^\Gamma &= u_d^\Delta = u_d, \\ u_q^\Gamma &= u_q^\Delta = u_q \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

разработаем математическую модель для электротехнического комплекса с САУ, показанную на рис. 1.

Данная общая модель содержит три составные части: модели синхронного генератора Г, синхронного двигателя Д и системы автоматического управления (система регулирования скорости СРС, функциональный преобразователь ФП, регулятор возбуждения генератора РВГ и ранее упомянутая система автоматической корректировки изменения скорости генератора).

С учетом [10] разработаны математические модели: система (3) – для синхронного генератора (с тиристорным возбудителем ТВ); система (4) – для синхронного двигателя Д. В зависимостях (3) и (4) используются следующие обозначения:  $\omega$  – частота вращения ротора машины;  $\mu$  – электромагнитный момент машины;  $\mu_c$  – момент сопротивления, приведенный к валу двигателя (который задавался при пуске насоса с закрытой задвижкой равным нулю);  $J$  – момент инерции гидроагрегата, приведенный к валу двигателя;  $s$  – скольжение;  $\Theta_{окс}^*$  – аргумент (угол поворота относительно непод-

$$\left. \begin{aligned} u_d &= \frac{d}{dt} \Psi_d^\Gamma + (1 + s^\Gamma) \Psi_q^\Gamma + i_d R_s; \\ u_q &= \frac{d}{dt} \Psi_q^\Gamma - (1 + s^\Gamma) \Psi_d^\Gamma + i_q R_s; \\ u_f^\Gamma &= \frac{d}{dt} \Psi_f^\Gamma + i_f^\Gamma R_f; \\ 0 &= \frac{d}{dt} \Psi_{\Delta d}^\Gamma + i_{\Delta d}^\Gamma R_{\Delta d}; \\ \Psi_d^\Gamma &= i_d x_d + i_f^\Gamma x_{ad} + i_{\Delta d}^\Gamma x_{ad}; \\ \Psi_q^\Gamma &= i_q x_q + i_{\Delta q}^\Gamma x_{aq}; \\ \Psi_f^\Gamma &= i_d x_{ad} + i_f^\Gamma x_f + i_{\Delta q}^\Gamma x_{ad}; \\ \Psi_{\Delta d}^\Gamma &= i_d x_{ad} + i_f^\Gamma x_{ad} + i_{\Delta d}^\Gamma x_{\Delta d}; \\ \Psi_{\Delta q}^\Gamma &= i_q x_{aq} + i_{\Delta q}^\Gamma x_{aq}; \\ \mu^\Gamma &= \Psi_d^\Gamma i_q - \Psi_q^\Gamma i_d; \\ \omega^\Gamma &= 1 + s^\Gamma; \\ \Theta_{окс}^* &= \int_0^t \omega^\Gamma dt - 2\pi \left[ \int_0^t \omega^\Gamma dt \right] / 2\pi; \\ u_f^\Gamma + T_\sigma \cdot \frac{du_f^\Gamma}{dt} &= k_\sigma u_{РВГ} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} u_d &= \frac{d}{dt} \Psi_d^\Delta + (1 + s^\Delta) \Psi_q^\Delta + i_d R_s; \\ u_q &= \frac{d}{dt} \Psi_q^\Delta - (1 + s^\Delta) \Psi_d^\Delta + i_q R_s; \\ u_f^\Delta &= \frac{d}{dt} \Psi_f^\Delta + i_f^\Delta R_f; \\ 0 &= \frac{d}{dt} \Psi_{\Delta d}^\Delta + i_{\Delta d}^\Delta R_{\Delta d}; \\ 0 &= \frac{d}{dt} \Psi_{\Delta q}^\Delta + i_{\Delta q}^\Delta R_{\Delta q}; \\ \Psi_d^\Delta &= i_d x_d + i_f^\Delta x_{ad} + i_{\Delta d}^\Delta x_{ad}; \\ \Psi_q^\Delta &= i_q x_q + i_{\Delta q}^\Delta x_{aq}; \\ \Psi_f^\Delta &= i_d x_{ad} + i_f^\Delta x_f + i_{\Delta q}^\Delta x_{ad}; \\ \Psi_{\Delta d}^\Delta &= i_d x_{ad} + i_f^\Delta x_{ad} + i_{\Delta d}^\Delta x_{\Delta d}; \\ \Psi_{\Delta q}^\Delta &= i_q x_{aq} + i_{\Delta q}^\Delta x_{aq}; \\ \mu &= \Psi_d^\Delta i_q - \Psi_q^\Delta i_d; \\ \mu - \mu_c &= J \frac{d\omega^\Delta}{dt}; \\ \omega^\Delta &= 1 + s^\Delta; \\ u_f &= u_{f\Delta} = const \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

вижной геометрической оси обмотки фазы А статора) вращающейся ортогональной координатной системы (ОКС) «d-q», совмещенной действительной осью «d» с осью магнитного поля статора СМ; [ ]\* – математическая операция выделения наибольшей целой части числа;  $u_d, u_q$  и  $i_d, i_q$  – проекции обобщенных векторов статорного соответственно напряжения и тока на оси «d» и «q» вращающейся ОКС;  $\Psi_d, \Psi_q$  – проекции обобщенного вектора потокосцепления статора на оси «d» и «q» вращающейся ОКС;  $\Psi_f$  – потокосцепление обмотки возбуждения;  $\Psi_{dd}, \Psi_{dq}$  – проекции обобщенного вектора потокосцепления демпферных обмоток на оси «d» и «q» вращающейся ОКС;  $R_s$  – активное сопротивление фазной статорной обмотки;  $R_f$  – активное сопротивление обмотки возбуждения;  $R_{dd}, R_{dq}$  – активные сопротивления демпферных обмоток по осям «d» и «q»;  $X_d, X_q$  – полные индуктивные сопротивления по осям «d» и «q»;  $x_{ad}, x_{aq}$  – сопротивления взаимной индукции по осям «d» и «q»;  $u_{pвг}$  – выходной сигнал регулятора возбуждения генератора РВГ;  $k_c$  и  $T_c$  – передаточный коэффициент и постоянная времени тиристорного возбудителя ТВ (принятые равными 0,06 и 0,01 с соответственно);  $u_{фн}$  – номинальное напряжение возбуждения. При этом в системах (3) и (4) одноименные величины синхронной машины, относящиеся к режиму двигателя и генератора, обозначаются индексом (сверху): «д» или «г» соответственно.

Приведем разработанную математическую модель САУ:

$$\left. \begin{aligned} \omega^{\Gamma*} &= \omega^{\Gamma} + T_c \frac{d\omega^{\Gamma}}{dt}, \\ u_{pвг} &= k_H \left[ k_1 (U_s^* - U_s) + k_2 \frac{d(U_s^* - U_s)}{dt} + k_3 \int (U_s^* - U_s) dt \right], \\ k_H U_s^* &= K \cdot k_c \omega^*, \text{ где} \\ K &= k_H U_{сн} / k_c \omega_H, \\ k_H U_{с.мин} &\leq k_H U_s^* \leq k_H U_{сн} \end{aligned} \right\} (5)$$

где из приведенных зависимостей: первая описывает систему регулирования скорости СРС [11], вторая – регулятор возбуждения генератора РВГ, а третья, четвертая и пятая – функциональный преобразователь ФП. В схеме САУ на рис. 1 при превышении на входе компаратора К фактическим значением модуля тока  $k_T I_s$  значения уставки  $k_T I_{с.уст}$  контакт прерывателя П размыкается и вход интегратора И отключается от входного сигнала (в результате чего выходной сигнал интегратора И становится неизменным). Когда же:  $k_T I_s \leq k_T I_{с.уст}$ , то указанный контакт прерывателя П замыкается и на выходе интегратора И продолжается возрастание при пуске выходного сигнала, приводящее к увеличению скорости  $\omega^{\Gamma}$  генератора Г и одновременно – к пропорциональному росту модуля его статорного напряжения  $U_s$ .

В зависимостях (5) используются следующие обозначения:  $\omega^{\Gamma*}$  – заданное значение скорости генератора Г;

$k_c$  и  $T_c$  – передаточный коэффициент и постоянная времени (принятая равной 1,6 с) системы регулирования скорости СРС [11];  $k_1, k_2$  и  $k_3$  – коэффициенты для пропорциональной, дифференциальной и интегральной части регулятора возбуждения генератора РВГ;  $U_{с.мин}$  и  $U_{сн}$  – соответственно минимальное и номинальное значения модуля статорного напряжения.

Для перевода из относительной в абсолютную систему единиц фазных статорных напряжений  $U_{sa}, U_{sb}, U_{sc}$  и токов  $I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}$ , модуля статорного потокосцепления  $\Psi$  и электромагнитного момента  $M$  двигателя применялись следующие зависимости [9, 10]:

$$\left. \begin{aligned} U_s &= U_{\sigma} \cdot [u_d^2 + u_q^2]^{1/2}, \\ \Delta\varphi_u &= (\sin u_d) \cdot \arcsin \left[ \frac{u_q}{(u_d^2 + u_q^2)^{1/2}} \right] + \frac{\pi}{2} (1 - \text{sign } u_d), \\ U_{sa} &= U_s \cdot \cos(\Theta_{окс}^* + \Delta\varphi_u), \\ U_{sb} &= U_s \cdot \cos(\Theta_{окс}^* + \Delta\varphi_u - 2\pi/3), \\ U_{sc} &= U_s \cdot \cos(\Theta_{окс}^* + \Delta\varphi_u + 2\pi/3), \\ I_s &= I_{\sigma} \cdot [i_d^2 + i_q^2]^{1/2}, \\ \Delta\varphi_I &= (\sin i_d) \cdot \arcsin \left[ \frac{i_q}{(i_d^2 + i_q^2)^{1/2}} \right] + \frac{\pi}{2} (1 - \text{sign } i_d), \\ I_{sa} &= I_s \cdot \cos(\Theta_{окс}^* + \Delta\varphi_I), \\ I_{sb} &= I_s \cdot \cos(\Theta_{окс}^* + \Delta\varphi_I - 2\pi/3), \\ I_{sc} &= I_s \cdot \cos(\Theta_{окс}^* + \Delta\varphi_I + 2\pi/3), \\ \Psi &= \Psi_{\sigma} \cdot [(\Psi_d^d)^2 + (\Psi_q^d)^2]^{1/2}, \\ M &= M_{\sigma} \cdot \mu \end{aligned} \right\} (6)$$

где  $U_{\sigma}, I_{\sigma}, \Psi_{\sigma}$  и  $M_{\sigma}$  – базисные значения для статорных напряжения, тока, потокосцепления и электромагнитного момента синхронной машины.

На *третьем этапе* с использованием зависимостей (1) – (6) и применением метода Рунге-Кутты была разработана имитационная (компьютерная) модель электро-технического комплекса с САУ из рис. 1, а затем на этой модели проведены исследования электромагнитных и механических процессов пуска двигателя Д.

При моделировании выбраны параметры явнополюсных синхронных машин, входящих в состав гидрогенераторов-двигателей типа СВО-733/130-36, установленных на Киевской ГАЭС (их основные технические характеристики приведены в табл. 1). Результаты моделирования электромагнитных и механических процессов частотного пуска гидроагрегата (способом от соседнего гидроагрегата согласно схеме на рис. 1) в насосном режиме представлены на рис. 2. На данных временных диаграммах показаны изменения: скорости  $\omega^{\Gamma}$ , модуля статорного потокосцепления  $\Psi$ , фазных статорных тока  $I_{sa}$  и напряжения  $U_{sa}$ . При этом следующим временным

участкам соответствует: (0 – 20) с – режим начального магнитного насыщения двигателя; (20–70) с – режим разгона двигателя на холостом ходу (при закрытой задвижке насоса Н) до синхронной скорости. Полученные электромеханические процессы свидетельствуют о плав-

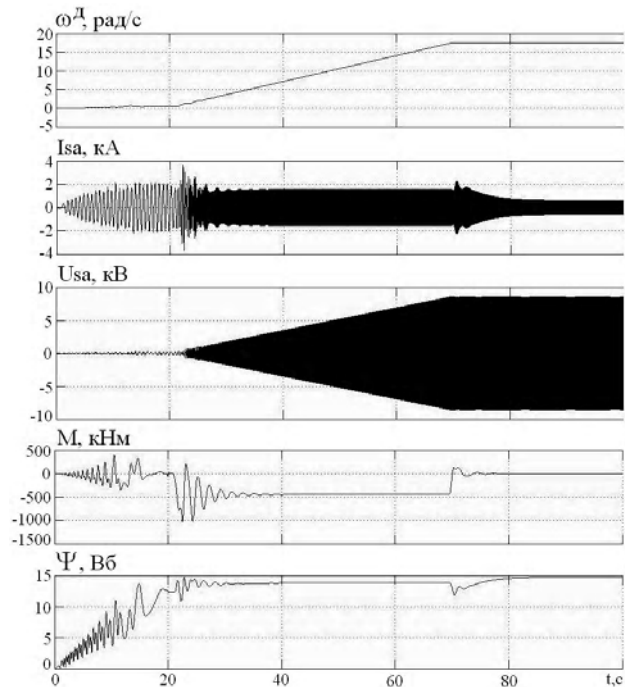


Рисунок 2 – Результаты моделирования пуска синхронной машины в насосном режиме способом частотного пуска от соседнего гидроагрегата

ном характере изменения скорости при пуске в основной части скоростного диапазона и наличии лишь небольших колебаний (бросков) фазного статорного тока и электромагнитного момента двигателя при начале пуска (не превышающих значений соответственно 3,8 кА и 1000 кНм).

Для сравнения на рис. 3 приведены результаты моделирования электромагнитных и механических процессов того же гидроагрегата при прямом асинхронном (без возбуждения) пуске в насосном режиме (именно этот способ пуска в настоящее время используется на Киевской ГАЭС). В этом режиме наблюдаются увеличенные значения статорных фазных токов и электромагнитного момента двигателя (достигающих значений соответственно 15 кА и 6600 кНм).

### ВЫВОДЫ

1. Разработанные математическая и имитационная модели позволяют рассчитывать электромагнитные и механические процессы частотного пуска гидроагрегата в насосном режиме, получающего питание от соседнего гидроагрегата.

2. Результаты моделирования указанного режима подтверждают достигнутое (путем начального магнитного насыщения синхронного двигателя и автоматической коррекции его темпа разгона) отсутствие увеличенных бросков статорных токов и электромагнитного момента в пусковом режиме (в отличие от прямого пуска). Качество полученных при этом электромеханических процессов приближается к стандартным процессам частотного пуска от статического преобразователя частоты.

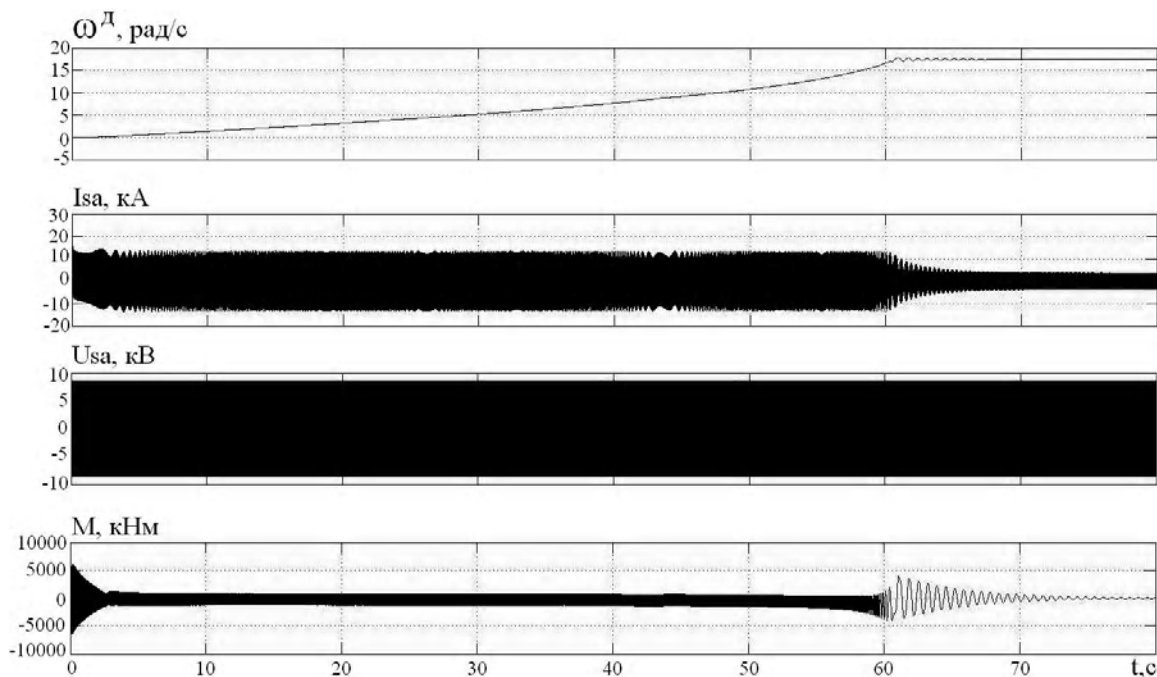


Рисунок 3 – Результаты моделирования прямого асинхронного (без возбуждения) пуска синхронной машины в насосном режиме

Таблица 1 – Параметры генератора-двигателя типа СВО-733/130-36

Основные технические характеристики синхронной машины	Численные значения	
	Генераторный режим	Режим двигателя
Номинальная мощность СМ: полная, кВ·А активная, кВт	45600 33400	45600 40000
Номинальное напряжение, В	10500±5%	10000±10%
Номинальный ток статора, А	2510	2635
Номинальный коэффициент мощности, cos φ	0,733	0,9
Частота тока, Гц	50	50
Номинальная частота вращения, об/мин.	166,7	166,7
Число пар полюсов	18	
Маховый момент ротора гидроагрегата, т·м <sup>2</sup>	5100	
Ток возбуждения на холостом ходу, А	597	547
Номинальный ток возбуждения, А	1220	1000
Номинальное напряжение возбуждения, В	212	174
Сопротивление фазы обмотки статора при постоянном токе и температуре плюс 15°С, Ом	0,00575	
Сопротивление фазы обмотки возбуждения при постоянном токе и температуре плюс 15°С, Ом	0,118	
Индуктивности, мГн: – синхронная по продольной оси ( $L_d$ ) – синхронная по поперечной оси ( $L_q$ ) – обмотки возбуждения ( $L_f$ ) – демпферной обмотки по продольной оси ( $L_{dd}$ ) – демпферной обмотки по поперечной оси ( $L_{dq}$ ) – взаимоиндуктивности по продольной оси ( $L_{ad}$ ) – взаимоиндуктивности по поперечной оси ( $L_{aq}$ )	8,770 7,438 8,489 7,5898 6,8035 7,0990 5,767	
Отношение максимального синхронного момента к номинальному синхронному		2,9

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- Muraffer G. Asynchronanlauf einer grossen 230 MW Synchro-maschine im Pumpspeicherwerk Vianden II / G. Muraffer // Brown Boveri Mitt. – 1974. – №7. – PP. 10–15.
- Lehuen C., Asynchronous starting of motor-generators of pumped storage stations / C. Lehuen, G. Ruelle, D. Simonnot // CIGRE. – 1972. – PP. 7–12.
- Электрическая часть электростанций: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / Под ред. Усова С.В. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 616с.
- Синюгин В. Ю. Гидроаккумулирующие электростанции в современной электроэнергетике / В. Ю. Синюгин, В. И. Магрук, В. Г. Родионов. – М. : ЭНАС, 2008. – 352 с.
- Xiao S., The coordination of Back-to-back starting and protections for pumped storage units / S. Xiao // North China Electric Power University, Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2012 Asia-Pacific, Beijing, China; Liu Jianhui, Kang Xiaojuan. – 2012. – PP. 1–4.
- Ma W. Discussion on the Control of Reversible Pumped-storage Unit Starting in Back-to-back Mode / W. Ma, X. Zhang // Hydropower Automation and Dam Monitoring. – Vol. 33. – Oct. 2009. – PP. 33–37.
- Karaagac U. Modeling and Simulation of the Starup of Pumped Storage Power Plant Unit / U. Karaagac, J. Mahseredjian, S. Denetiere // Ecole Polytechnique de Montreal. International Conference on Power Systems Transients (IPST 2009) in Kyoto, Japan, June 3 – 6. – 2009. – PP. 1–7.
- Ковач К.П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К. П. Ковач, И. Рац // Пер. с нем. яз. – М. : Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.
- Пивняк Г.Г. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией / Г. Г. Пивняк, А. В. Волков. – Днепропетровск : НГУ, 2006. – 470 с.
- Копылов И.П. Электромеханические преобразователи энергии / И. П. Копылов. – М. : Энергия, 1973. – 400 с.
- Волков А. В. Исследование режима пуска гидротурбины / А. В. Волков, В. В. Литвинов, В. А. Волков, К. Н. Морозова // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. – Вип. 2 (62). – 2013. – С. 123–134.

Статья поступила в редакцию 09.04.2015  
После доработки 20.04.2015

Волков В. О.<sup>1</sup>, Довбищук Д. В.<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>К.т.н., доцент кафедри гідроенергетики, Запорізька державна інженерна академія, Україна, E-mail: green\_stone@ukr.net

<sup>2</sup>Магістр, інженер, Запорізький кабельний завод

**УДОСКОНАЛЕННЯ ЧАСТОТНОГО ПУСКУ ГІДРОАГРЕГАТУ ГІДРОАКУМУЛЮЮЧОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ В НАСОСНОМУ РЕЖИМІ**

*Виконано аналіз існуючих способів пуску гідроагрегатів в насосному режимі на гідроакумуючих електростанціях (ГАЕС). Удосконалено частотний спосіб пуску гідроагрегату в насосному режимі від сусіднього гідроагрегату, що працює в генераторному режимі. Розроблено математичну модель удосконаленого способу даного пуску гідроагрегату. На основі зазначеної математичної моделі створена імітаційна комп'ютерна модель, за допомогою якої досліджені електромагнітні та механічні процеси частотного пуску стосовно до гідроагрегатів, які встановлені на Київській ГАЕС.*

**Ключові слова:** гідроагрегат, пуск, насосний режим, система автоматичного керування, моделювання електромеханічних процесів.

Volkov V. A.<sup>1</sup>, Dovbischuk D. V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ph.D., assistant professor of hydropower, Zaporizhzhya State Engineering Academy, Ukraine, E-mail: green\_stone@ukr.net

<sup>2</sup>Past master, engineer Zaporozhye cable factory

**IMPROVEMENT OF FREQUENCY START OF HYDROELECTRIC PUMPED STORAGE POWER PLANT IN THE PUMPING MODE.**

*The analysis of the existing methods of the hydraulic units start in pump mode at pumped storage power plants (PSP) is done. The introduction of the initial magnetic saturation of the synchronous motor and the implementation of automatic correction of the change rate of its frequency and the synchronous generator voltage improve frequency of starting method in hydro pump mode from a nearby hydroelectric unit operating in generator mode.*

*The general mathematical model of the improved method for starting the hydraulic unit makes possible the rotation of a conventional system of relative units in projections of generalized synchronous machine vectors on the orthogonal coordinate system axis focused on its magnetic field of the rotor. This general mathematical model contains mathematical model of synchronous generator, synchronous motor and control unit.*

*On the basis of this mathematical model the simulation (computer) model of the improved method for frequency start at hydro pump mode from a nearby hydroelectric unit is created. Through this simulation model the electromagnetic and mechanical processes of the method being applied to start hydraulic units installed on the PSP Kiev in Ukraine are investigated and evaluated.*

**Keywords:** hydroelectric, start-up, the pump mode, automatic control system, modeling of electromechanical processes.

**REFERENCES**

1. Muraffer G. Asynchronanlauf einer grossen 230 MW Synchro-maschine im Pumpspeicherwerk Vianden II. Brown Boveri Mitt, 1974, No 7, pp. 10–15.
2. Lehuen C., Ruelle G., Simonnot D. Asynchronous starting of motor-generators of pumped storage stations, CIGRE, 1972, pp. 7–12.
3. Elektricheskaya chast electrostanciy: Uchebnik dlya vuzov. – 2-e izd., pererab. i dop./Pod.red. Usova S.V. – L.: Energoatomizdat, 1987. – PP. 616.
4. Sinugin V.U. Gidroakkumulruyuschie elektrostancii v sovremennoy electroenergetike / V.U. Sinugin, V. I. Magruk, V.G. Rodionov. – M.: ENAS, 2008. – PP. 352.
5. Xiao S., The coordination of Back-to-back starting and protections for pumped storage units / S. Xiao // North China Electric Power University, Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2012 Asia-Pacific, Beijing, China; Liu Jianhui, Kang Xiaojuan, 2012, pp. 1–4.
6. Ma W. Discussion on the Control of Reversible Pumped-storage Unit Starting in Back-to-back Mode / W. Ma, X. Zhang // Hydropower Automation and Dam Monitoring, Vol. 33, Oct. 2009, pp. 33–37.
7. Karaagac U., Mahseredjian J., Denetiere S. Modeling and Simulation of the Starup of Pumped Storage Power Plant Unit. Ecole Polytechnique de Montreal. International Conference on Power Systems Transients (IPST 2009) in Kyoto, Japan, June 3–6, 2009, pp. 1–7.
8. Kovach K. P., Rac I. P. Perehodnie processi v mashinah peremennogo toka. Per. s nem. Yaz, Moscow, Gosenergoizdat, 1963, pp. 744.
9. Pivnyak G. G., Volkov A. V. Sovremennye chastotno-regularuemie asinhronnie elektroprivodi s shirotno-impulsnoy modulyaciey. Dnepropetrovsk: NGU, 2006, pp. 470.
10. Kopilov I. P. Electromechanicheskie preobrazovateli energii. Moscow, Energiya, 1973, pp. 400.
11. Volkov A. V., Litviniv V. V., Volkov V. A., Morozova K. N. Issledovanie regima puska gidroturbini. Visnik Nacionalnogo universitetu vodnogo gospodarstva ta prirodokoristuvannya, Vip. 2 (62), 2013, pp. 123–134.