

**С.Ф. АРТЮХ**, д-р техн. наук, проф, НТУ «ХП»;  
**С.С. ГІРЯВЕЦЬ**, студент НТУ «ХП»

### ПОКРАЩЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ЕНЕРГОБЛОКАХ ГАЕС, ЯКІ ВКЛЮЧАЮТЬ ГІДРОАГРЕГАТИ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ З НЕСИНХРОННОЮ ЧАСТОТОЮ ОБЕРТАННЯ

В даній роботі показано, що одним із заходів щодо підвищення ефективності роботи гідроагрегатів ГАЕС, які працюють зі змінними напорами, є їх переведення на роботу з несинхронною частотою обертання. Для узгодження їх роботи з мережею, в схему блока може бути введений силовий перетворювач, котрий, окрім того, є причиною зниження показників якості електроенергії на виході енергоблоку. Показані шляхи боротьби з цією проблемою.

В данной работе показано, что одним из мероприятий для повышения эффективности работы гидроагрегатов ГАЭС, работающих с переменными напорами, является их перевод на работу с несинхронной частотой вращения. Для согласования их работы с сетью, в схему блока может быть введен силовой преобразователь, который, кроме того, служит причиной понижения качества электроэнергии на выходе энергоблока. Показаны пути борьбы с этой проблемой.

In this paper we show that one of the measures to improve the efficiency of hydroelectric pumped storage, working with variable pressure, is their translation to work with asynchronous speed. In order to harmonize their work with the network, the circuit block can be put power converter, which also serves as a reason for lowering the quality of electric power at the output power. The ways to overcome this problem.

Однією з найважливіших проблем в галузі енергетики є підвищення ефективності енергоустановок електричних станцій. Це в першу чергу стосується гідроелектростанцій, які працюють із змінним напором, до яких належать гідроакумулюючі електростанції (ГАЕС).

В даний час нормальним вважається такий режим роботи агрегатів електростанції, при якому забезпечується його постійна частота обертання, незалежно від коливань параметрів навантаження або енергоносія. З досвіду експлуатації ГЕС відомо, що ККД гідротурбіни значною мірою залежить від напору, який визначається різницею рівнів верхнього та нижнього басейнів. На відміну від ГЕС, напір на ГАЕС швидко змінюється, що зумовлено принципом дії таких станцій. Проведені дослідження дозволили виявити залежність ККД від напору, представлену в загальному вигляді на рисунку 1, крива 1.

Також було показано, що одним із можливих заходів щодо підвищення ККД гідроагрегатів ГАЕС є їх переведення на роботу із змінними частотами обертання, при цьому ККД буде триматися практично на одному рівні [1], що також зображено на рисунку 1, крива 2.

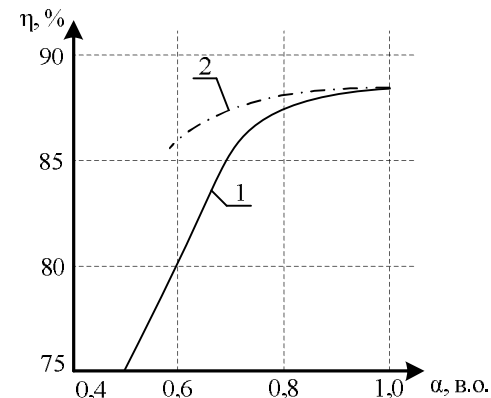


Рис. 1 – Залежність максимального ККД турбіни від відносного напору  $\alpha = H/H_{\text{ном}}$ : 1 – для синхронної частоти обертання; 2 – для змінної частоти обертання

Одним із засобів узгодження роботи такого блока з мережею, є введення у його склад силового перетворювача частоти, що показано на рисунку 2.

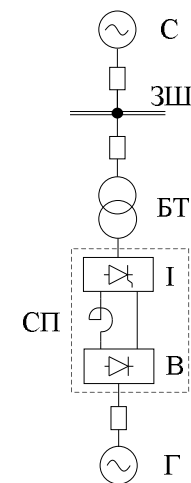


Рис. 2 – Принципова схема блоку ГАЕС з включеним у склад тиристорним перетворювачем

Таблиця 2 – Гармонічний склад напруги та струму на виводах ВП

Гармоніки	Швидкість обертання	$\alpha$ , град	Коефіцієнт $n$ -ї гармонічної складової для гармонік, %					Коефіцієнт спотворення синусоїдальності, %
			3	5	7	11	13	
Напруги	0,8	20	0,06	22,9	20,8	14,6	11,7	36,2
	1	40	0,04	19,6	15,7	7,3	3,7	26,5
Струму	0,8	20	0,6	18,4	12	5,8	4,6	23,2
	1	20	0,13	16,8	10	3,15	1,53	19,9

де:  $\alpha$  – кут керування тиристорами випрямляча.

Підвищення показників якості електроенергії можливе за допомогою схемних та конструктивних методів, які включають в себе застосування спеціальних схем розподілу навантаження, що спричиняє гармонічне забруднення, та застосування обладнання з покращеними енергетичними характеристиками, а також за допомогою застосування спеціального фільтро-компенсуючого обладнання.

Схемні та конструктивні методи мають бути застосовані ще на стадії проектування, або коли рівні гармонічних складових незначно перевищують допустимі. В нашому випадку використання цих методів недоцільне.

Фільтро-компенсуючі пристрої (ФКП) поділяються на пасивні та активні пристрої.

*Пасивні ФКП* представляють собою сукупність ємнісних та індуктивних елементів (реактори та конденсаторні батареї), налаштованих в резонанс на певні частоти. Таким чином, принцип дії пасивних ФКП полягає в створенні низькоопірного контуру для струмів вищих гармонік, що будуть ним циркулювати, не потрапляючи в мережу.

Перевагами використання пасивних ФКП є: простота конструкції, відносно низька вартість, відсутність необхідності регулярного обслуговування.

Недоліками: можливе зниження ефективності при зміні параметрів мережі, негативний вплив на перехідні процеси, принцип «один ФКП – одна гармоніка», та, внаслідок цього, відносно велика площа, що потрібна для їх встановлення.

Для компенсації гармонік від силового перетворювача, що входить в склад блоку ГАЕС, були розраховані потужності ФКП для 5, 7, 11 та 13 гармонік. Розрахунки проводились спрощеним способом, тобто для оцінки потужностей і параметрів реактору та КБ не враховувалися можливості виникнення резонансного контуру с мережею, виникнення

В цьому випадку частота обертання гідроагрегата не впливає на частоту електроенергії, що надходить в систему. Разом з тим, як показують дослідження, в цьому випадку в напрузі на збірних шинах, та в струмі високої напруги блочного трансформатора з'являються вищі гармоніки (ВГ), які призводять до погіршення якості електроенергії, що надходить в систему. Окрім цього, вищі гармонічні складові призводять до численних порушень роботи устаткування, таких як додатковий нагрів та вихід з ладу конденсаторів, запобіжників, трансформаторів, електродвигунів, порушення роботи систем контролю, спотворення форми напруги, її відхилення від номінальних параметрів та інші. Інакше кажучи, наявність вищих гармонік знижує ефективність використання устаткування.

Як можемо бачити, необхідність підтримувати якість електроенергії в допустимих межах є очевидною. Допустимі рівні гармонічних складових наведені у ГОСТ 13109-97, що встановлює показники та норми якості електроенергії в електричних мережах загального призначення.

Паспортні дані гідроагрегату СВО-733/130-36, який входить у склад блоку Київської ГАЕС, наведені у таблиці 1.

Таблиця 1 – Паспортні дані гідроагрегату СВО-733/130-36

Найменування	$S_{НОМ}$ , МВА	$P_{НОМ}$ , МВт	$U_{НОМ}$ , кВ	$I_{НОМ}$ , А	$\cos \varphi$	$n$ , 1/хв
СВО-733/130-36	41,5	33,4	10,5	2510	0,73	166,7

Для цього генератора були проведені виміри напруги та струму на виводах перетворювача для подальшого аналізу гармонічного складу. Оскільки передбачається експлуатація агрегату в режими роботи зі змінними обертами, виміри проводилися для декількох значень швидкості обертання, для виявлення максимальних значень гармонічних складових. Результати гармонічного аналізу представлені у таблиці 2 (вказані лише максимальні значення рівню гармонічних складових для вказаних швидкостей обертання). Табличні значення дані у відсотках до номінальних струму та напруги.

Як видно, значення коефіцієнту  $n$ -ї гармонічної складової для 5, 7, 11 та 13 гармонік та коефіцієнту спотворення синусоїдальності кривої напруги значно перевищують гранично допустимі значення.

взаєморезонансів між ФКП та величина реактивної потужності, яку потрібно компенсувати.

Результати розрахунків параметрів ФКП наведені у таблиці 3.

На базі комплектного ФКП, який пропонується виробником «Електроінтер» були оцінені габаритні показники ФКП та площа, яку він буде займати (рисунок 3).

Таблиця 3 – Результати розрахунку ФКП 5, 7, 11 та 13-ї гармонік

Порядок фільтру	$C$ , мкФ	$L$ , мГн	$X_{EKB(1)}$ , Ом	$I_1$ , А	$I_{\Sigma(n)}$ , А	$I_{(n)}$ , А	$\Sigma I$ , А	$Q$ , МВАр
5	17	23,9	179,8	33,7	125	421,68	441	8,02
7		12,2	183,5	33	125	251	282,34	5,14
11		4,9	185,8	32,6	63	79,06	106,28	1,94
13		3,5	186,2	32,6	50	38,4	70,97	1,29

де  $C$  – ємність конденсаторної батареї;

$L$  – індуктивність реактору;

$X_{EKB(1)}$  – еквівалентний опір фільтру для першої гармоніки;

$I_1$  – струм першої гармоніки, який буде протікати через фільтр;

$I_{\Sigma(n)}$  – струми інших гармонік та інтергармонік, які будуть протікати через фільтр;

$I_{(n)}$  – струм гармоніки, на яку настроєний фільтр;

$\Sigma I$  – діюче значення сумарного струму, який буде протікати через фільтр;

$Q$  – потужність фільтру.

Площа, яку буде займати система пасивних ФКП становитиме  $S = 40 \text{ м}^2$ .

Активний ФКП служить перетворювачем змінного/постійного струму з ємнісним або індуктивним накопичувачем електричної енергії на стороні постійного струму, що формує методами імпульсної модуляції усереднене значення струму чи напруги, що дорівнює різності гармонічного струму чи напруги та синусоїдального струму чи напруги основної частоти. Активні ФКП мають елементи управління, що дозволяють змінювати частотні характеристики фільтру.

Принцип дії активних ФКП полягає у формуванні струму, що співпадає з гармонічним струмом, та подачі цього струму в систему електропостачання в протифазі до гармонічного, що призводить до повної компенсації гармонічних складових.

Перевагами використання активних ФКП є: компенсація всього гармонічного спектру, від 2-ї до 50-ї гармоніки, або вибіркова компенсація заданих гармонік, неможливість виникнення резонансів з мережею, велика швидкодія (до 100мкс).

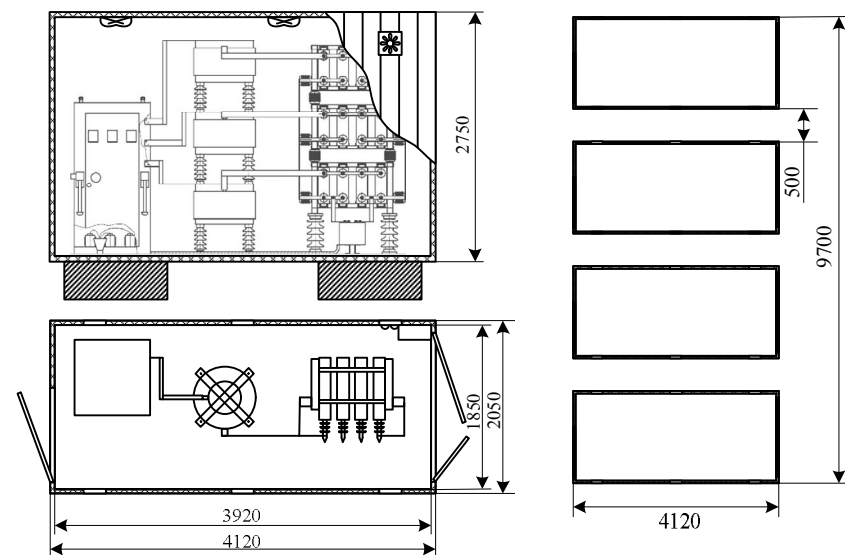


Рис. 3 – Габаритне креслення боксу з ФКП та площадки, яку будуть займати установки для фільтрації 5, 7, 11 та 13 гармонік

Недоліками у таких фільтрів є те, що у високовольтних мережах ФКП з послідовним включенням за класом ізоляції повинен розраховуватися на повну напругу мережі, висока складність алгоритмів керування, висока встановлена потужність та вартісні показники, більша ефективність фільтрації ВГ.

Оцінка потужності активного ФКП була виконана враховуючи лише потужність вищих гармонік, що складає  $S = 10,6 \text{ МВА}$ .

На ринку силового обладнання широко представлені активні ФКП на напругу 0,4 кВ. Проте в нашому випадку передбачається встановлення ФКП на напрузі 10 кВ. Інформації щодо пристроїв на таку напругу у вільному доступі немає, оскільки вони виготовляються за індивідуальними замовленнями. Тому приблизна оцінка габаритних розмірів та площі, яку буде займати ФКП, проводилася шляхом порівняння з перетворювачем частоти, який має потужність того ж порядку.

Для порівняння був обраний перетворювач частоти серії СНН100 від виробника INVT, технічні характеристики якого представлені у таблиці 4. Площа, яку буде займати активний ФКП становитиме  $S = 16,2 \text{ м}^2$

Таблиця 4 – Технічні характеристики перетворювача частоти

Модель	$U_{НОМ}$ , кВ	$S_{НОМ}$ , кВА	$I_{НОМ}$ , А	Габаритні розміри [ДхГхВ], мм
СНН100-7100-10	10	9000	512	10800x1500x2970

Таким чином, бачимо, що на даному етапі активні ФКП є більш вигідними за технічними показниками, оскільки встановлена потужність установки є нижчою та площа, яку вона буде займати, буде меншою на 60% від площі пасивного ФКП. Проте потрібні подальші розрахунки економічної ефективності встановлення ФКП на ГАЕС.

Приймаючи до уваги все вищезазначене можна зробити такі висновки:

5 Показано, що для компенсації вищих гармонік в ланці блоку ГАЕС, агрегати якого працюють з несинхронною частотою обертання, є можливість встановлення фільтро-компенсуючих пристроїв двох різних типів, а саме пасивних та активних.

6 Проведена приблизна оцінка потужностей та габаритних показників таких ФКП, а також показано, що технічно більш доцільним для даних блоків є використання активних ФКП.

7 Необхідно провести більш детальні розрахунки з урахуванням усіх факторів, що впливають на вибір потужності ФКП, а також розрахунок їх економічних показників.

**Список літератури:** 1. *Артюх С.Ф.* Анализ целесообразности агрегатов электростанции в режиме переменной частоты вращения / *С.Ф. Артюх* // Энергохозяйство за рубежом. – 1988. – №3. – С.30 – 33. 2. *Артюх С.Ф.* Управление технологическими процессами агрегатов ГЭС, работающих с переменными оборотами: автореф. дис. докт. Наук / *Артюх Станислав Федорович.* – Х., 1994г. 3. *Жежеленко И.В.* Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / *И.В. Жежеленко* – М.: Энергоатомиздат. – 2000.

*Надійшла до редколегії 10.04. 2012 р.*