

## Полеви изследвания на хидроагрегат

Валентин Обретенов

**Field studies of hydro aggregate:** Presented and analyzed are results from field tests of hydro aggregate №2 of Pasarel HPP (Bulgaria) in order to determine the performance of turbine and hydro aggregate. Measured values are efficiency, the head and power of turbine for seven modes of operating range. Measurements were made in accordance with IEC Standard 60041. It is also certainly increase the pressure at the inlet of the turbine in transient modes. The results allow to analyze the characteristics of the turbine in order to establish performance after repair her stream part.

**Key words:** Francis turbine, characteristics, efficiency, head, power, discharge, mode of operation.

### ВЪВЕДЕНИЕ

Обект на изпитването е хидроагрегат №2 (ХГ2) във ВЕЦ "Пасарел" след планов ремонт на проточната част на турбината и модернизация на системата за управление. Основната цел на тези полеви изследвания е определянето на

работните характеристики на турбината и хидроагрегата. Направени са измервания на стойностите на к.п.д., напора и мощността на турбината и хидроагрегата за седем режима на работа от експлоатационния диапазон. Измерванията са извършени съгласно с IEC Стандарт 60041 [3] и изискванията на наредбата [1]. Определено е също нарастването на налягането в тръбопровода в преходните режими на

работка. Получените резултати дават възможност за анализиране характеристиките на турбината с оглед установяване ефективността на работния процес след извършения ремонт на проточната й част.

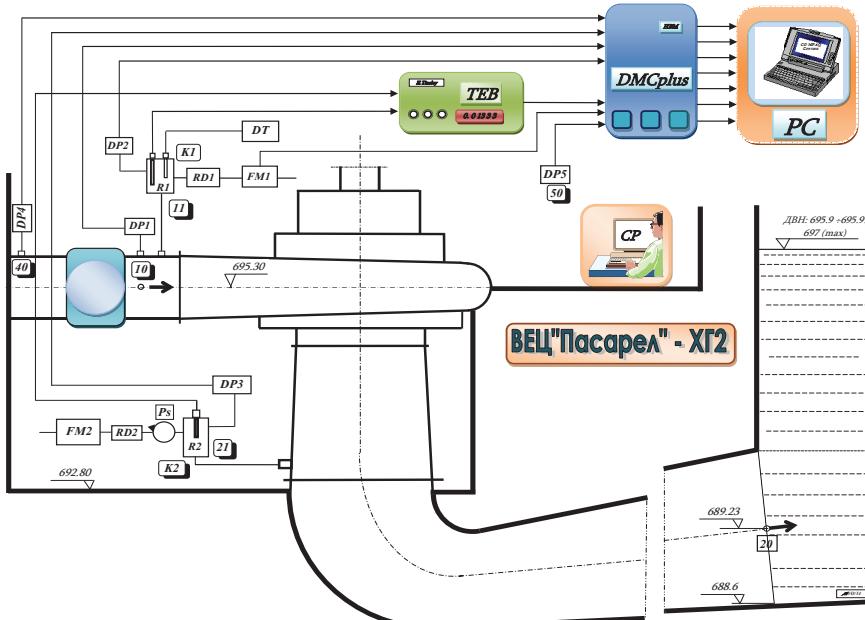
ВЕЦ "Пасарел" е част от каскада „Искър“. В централата са инсталирани три хидроагрегата, съставени от вертикални Францисови водни турбini и синхронни генератори. Основните разчетни параметри на изпитаната турбина са показани в табл.1. Турбината е произведена през 1954г. от фирмата CKD Blansko (Чехословакия).

В работата са представени и анализирани резултатите от направените полеви (натури) изследвания на хидроагрегат №2.

### СХЕМА НА ИЗМЕРВАНИЯТА

Принципна схема на измервателната система, местата и начинът на свързване на уредите са показани на фиг.1. Сигналите от термометрите в двете мерни сечения R1 и R2 се преобразуват в електрически величини в термодинамичния мост ТЕВ и заедно със сигналите от преобразувателите за налягане (DP1÷DP5) и дебитометра FM1, присъединен към калориметъра K1 се подават на цифровия измерителен уред DMCplus. Преобразуваните в цифров код величини се следят и записват в реално време от персонален микрокомпютър НР. Компютърът обработва опитните данни с помощта на специализиран софтуер CATMAN, разработен от Hottinger Baldwin Messtechnik за работа в среда на Windows. Данните се записват в продължение на 60s през интервал от 1s във файлове, след което се обработват с помощта на програмната система ORIGIN. Получените по този начин данни, както и данните от останалите измервателни уреди се обработват чрез програмата EFTDM, версия V.05. Регистриращата апаратура е инсталлирана на командния пункт (СР – фиг.1) в машинната зала.

Изпитването на турбината е направено за седем режима на работа, характеризиращи се с различни стойности на отварянето на направляващия апарат (респ. ефективни мощности). Измерването на активната мощност на генератора (не е показано на схемата) се извършва, като допълнително към измервателните вериги на генератора са включени два ватметъра, а също така и контролен волтметър за едно линейно напрежение и един фазен ток. Включването на ватметрите е индиректно през измервателни трансформатори по схема на Арон.



Фиг.2. Схема на турбината и на измервателната апаратура

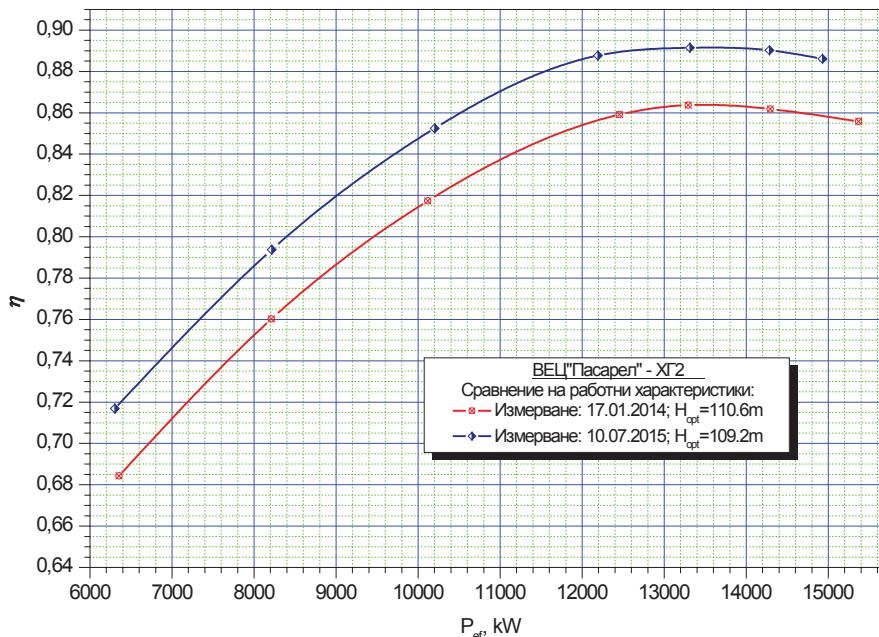
## РЕЗУЛТАТИ

### A. Енергийни изследвания

На основата на резултатите, получени след енергийното изследване на турбина №2 от ВЕЦ "Пасарел", могат да бъдат направени следните по-важни изводи:

1. Измерените стойности на к.п.д. на турбината не отговарят на съвременните изисквания към енергийните характеристики на Францисовите турбини с тази бързоходност и мощност [2,5]. Максималната стойност на к.п.д. на турбината ( $\eta_{max}=0.8915$ ) е измерена за напор  $H=109.2\text{m}$ . Според стойностите на коефициента на бързоходност ( $n_s=138.4$  в оптималния режим), турбината е в ниския сегмент на Францисовите турбини с нормална бързоходност. От направеният анализ на резултатите от измерванията на същата машина през януари 2014г. (преди ремонта и според данните за използвания модел) е известно, че максималната стойност на к.п.д. в оптималния режим на модела би трябвало да бъде 0.915, т.е. с 2.35% повисока от измерената. Обективно погледнато, посочената максимална стойност на к.п.д. (според данните от модела) е приемлива за 50-те години на миналия век, но несъмнено е ниска от гледна точка на съвременното състояние на хидротурбостроенето.

В подобни случаи по-важно е важно да се установят резултатите от направения ремонт и модернизация на хидроагрегата [4]. По отношение на водната турбина основният резултат би трявало да бъде повищена ефективност на работния процес. От тази гледна точка е уместно да се направи сравнение с аналогична характеристика (к.п.д. – ефективна мощност), получена след изпитването, направено непосредствено преди започване на ремонтните работи. На фиг.2 е направено сравнение на работните характеристики на турбината според данните от настоящото измерване и характеристиката на същата машина според измерването от 2014г. (при други стойности на напора).

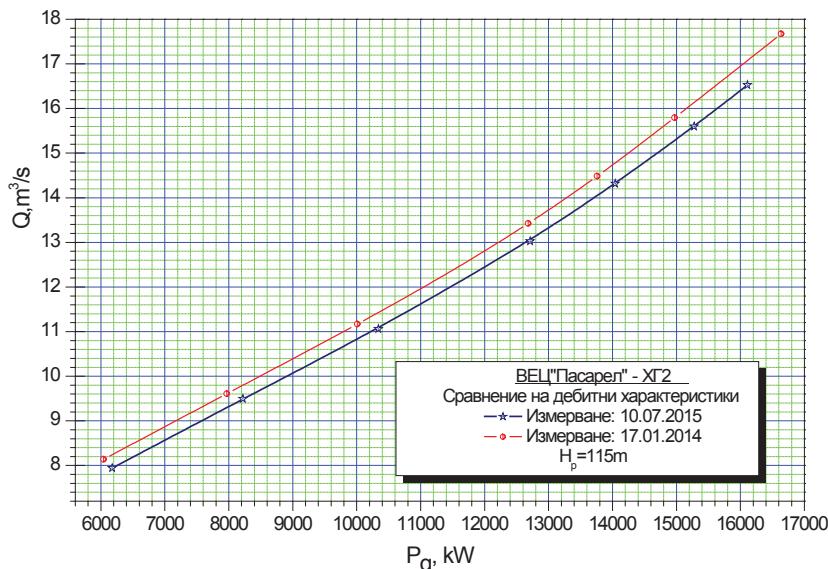


Фиг.2. Сравнение на характеристики

От данните се вижда очевидната разлика в измерените стойности на к.п.д. в целия експлоатационен диапазон. Като се вземе предвид, че измерванията са направени за много близки стойности на напора (т.е. за практически равни стойности на приведената еднометрова честота на въртене  $n_1$ ), може да се направи извода, че ремонтираната машина работи със забележимо по-висока ефективност. В оптималния режим на работа (за мощност  $P_{opt} \approx 13500$  kW), разликата в стойностите на к.п.д. достига  $\Delta\eta=2.78\%$ . Тази разлика е безспорна и надвишава стойността възможната грешка, определена в съответствие със стандарта [3] ( $\pm 0.961$ ).

2. Резултатите от направените изпитвания позволяват да бъде определена и т.нр. дебитна характеристика, т.е. изменението на дебита на турбината за различни отваряния на направляващия апарат, респ. различни товари на хидроагрегата. Следва да се има предвид, че стойностите на дебита са определени косвено (изчислени са посредством измерените стойности на к.п.д. на турбината и на активната мощност на генератора). При експлоатацията на всяка водна турбина тази характеристика има важно значение от гледна точка на определянето на т.нр. специфичен разход, а също така и на параметрите на режимната таблица на

централата. Предвид повишената ефективност на работния процес в турбината след ремонта е логично да се очаква намаляване стойностите на дебита за определена стойност на мощността и напора. Това се вижда и на фиг.3, където е направено сравнение на дебитните характеристики от двете измервания. Тъй като те са направени за близки, но все пак различни стойности на напора, сравнението е направено с преизчислените [3] стойности на дебита за разчетната стойност на напора ( $H_p=115m$ ).



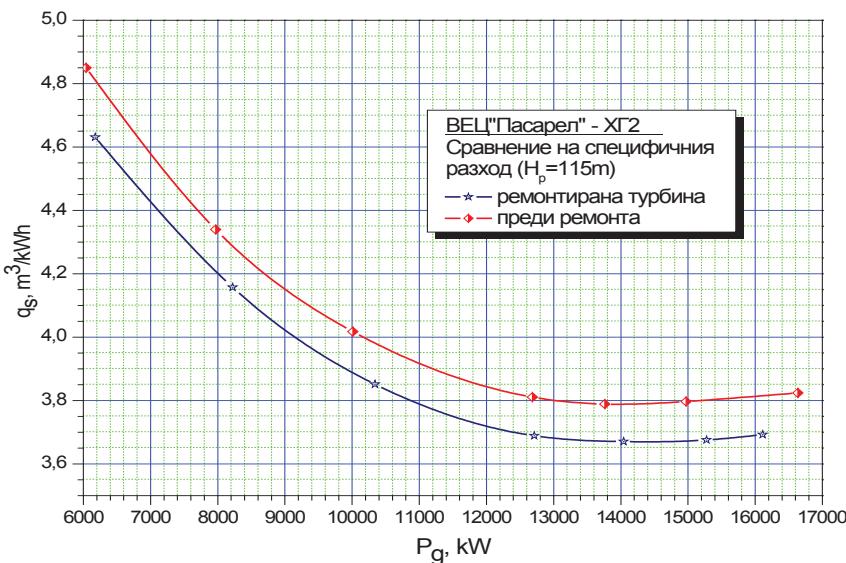
Фиг.3. Сравнение на дебитни характеристики

#### Б. Режими на работа

Известно е, че от гледна точка на ефективността на работния процес, оптималната зона на работа на един хидроагрегат се дефинира в интервала, за който стойността на к.п.д. се понижава до 5% спрямо максималната му стойност [2]. За турбина №2 това означава, че оптималната зона за напор  $H \geq 109m$  е при товари  $P > 9500$  kW. От друга страна изпитванията показват, че е възможна работа на турбината при товари дори около  $0.4P_{max}$ . Това не е изненадващо, предвид стойността на коефициента на бързоходност на турбината. Уместно е да се отбележи също, че честотата на въртене е по-ниска от съвременната интерпретация на този въпрос [2].

Направеният извод относно оптималната зона за експлоатация на хидроагрегата се потвърждава и ако се направи пресмятане на стойностите на т.напр. специфичен разход  $q_s$ . Тази важна за всеки хидроагрегат характеристика се дефинира като обем вода, необходим за производството на 1 kWh електроенергия. Освен за определяне на оптималната зона за експлоатация на хидроагрегата, в реалната хидроенергетика с този параметър се пресмятат обемите вода, изразходвани за производство на електроенергия във ВЕЦ при самостоятелна и паралелна работа на хидроагрегатите в нея. На фиг.4 е показана зависимостта на  $q_s$  от генераторната мощност  $P_g$ . Вижда се, че в интервала от активни мощности на

генератора  $10000 \div 14600$  kW стойностите на специфичния разход запазват сравнително ниски стойности (минималната стойност е  $q_s=3.857$   $\text{m}^3/\text{kWh}$ ). С намаляването на активната мощност на генератора, стойностите на специфичния разход непрекъснато нарастват и при минималния товар достигат до  $q_s=4.688$   $\text{m}^3/\text{kWh}$  (увеличение с 21.54%). Предвид по-високата ефективност на работния процес, стойностите на специфичния разход на хидроагрегата с ремонтираната турбина са по-ниски в целия изследван диапазон. Обективно сравнение може да се направи, ако стойностите на дебита и мощността се приведат към разчетната стойност на напора и с тях се определят стойностите на специфичния разход. На фиг.4 е показана и зависимостта на специфичния разход от генераторната мощност на агрегата преди ремонта. Сравнението ясно показва предимството по този важен показател на агрегата с ремонтираната турбина.



Фиг.4. Сравнение на специфичния разход

### 3. Колебание на налягането на входа на турбината

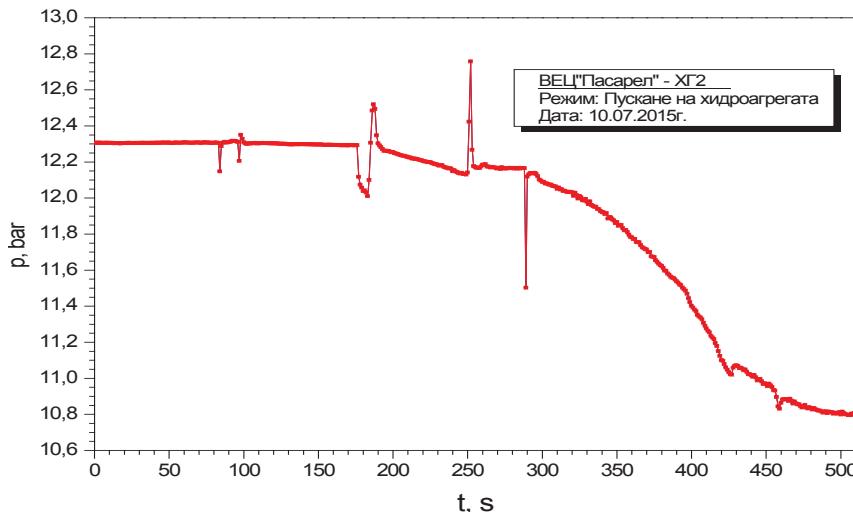
Измерванията са направени в две мерни сечения – непосредствено до входа на спиралната камера на турбината и на изхода на напорния тръбопровод (преди сферичния затвор). За целта са използвани преобразувателите за налягане DP1 и DP4 (фиг.1). Тук са представени резултатите от изследваните два преходни режима (измервания са правени и за режимите от енергийното изследване):

- Пускане на хидроагрегата и натоварване до максимален товар;
- Нормално спиране на хидроагрегата (от минимален товар).

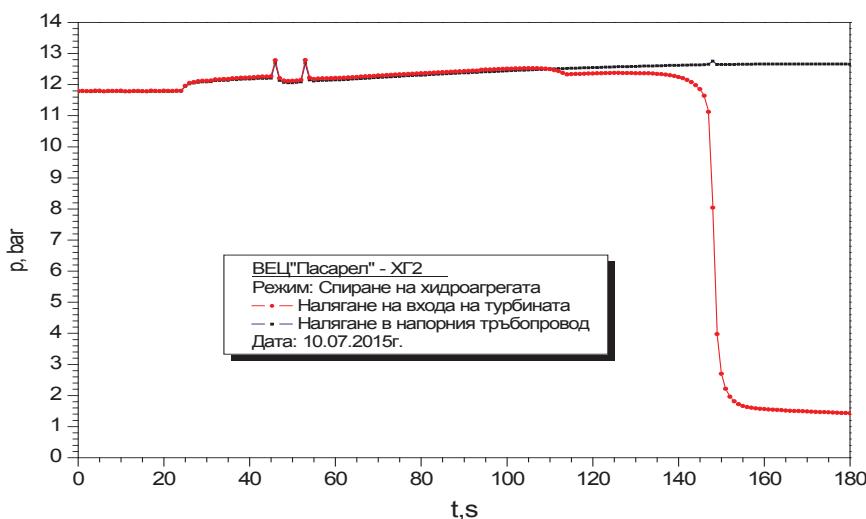
Резултатите от измерванията в преходните режими на работа са показани в графичен вид на фиг.5 и фиг.6. Анализът на данните дава възможност да бъдат направени следните по-важни изводи:

- При пускането на хидроагрегата е измерена максимална стойност на абсолютното налягане на входа на турбината  $p_{max,p} = 12.7582\text{bar}$ . Това означава нарастване на налягането с  $0.4251\text{bar}$  (относително нарастване 3.45%) спрямо налягането при неработещи машини.

- В режим на нормално спиране е измерена максимална стойност на абсолютното налягане на входа на турбината  $p_{max} = 12.785 bar$ . Ако се направи сравнение с налягането при неработещи машини, то нарастването на налягането е с 0.4793 bar (относителното нарастване е 3.89%).



Фиг.5. Изменение на налягането на входа на турбината при пускане



Фиг.6. Изменение на налягането на входа на турбината при спиране

От анализа на данните се вижда, че по-голямо относително нарастване на налягането е регистрирано в режим на спиране на хидроагрегата. Освен това относителното нарастване на налягането при пускане е забележимо по-голямо в сравнение с измерванията през 2014г., докато при спиране е незначително по-малко. Вероятно тези разлики се дължат на изменениета в системата за управление на хидроагрегата (времената за отваряне и затваряне са различни).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Резултатите от проведените полеви изследвания на хидроагрегат №2 от ВЕЦ "Пасарел" дават основание да бъдат направени следните по-важни изводи:

1. Определени са стойностите на к.п.д., напора, дебита и ефективната мощност на турбината при различни режими на работа, характерни за експлоатацията ѝ. Това дава възможност да бъде направена оценка на ефективността от направения ремонт на турбината и модернизацията на системата за управление на хидроагрегата.

2. Анализът на резултатите от изпитванията показва забележимо повишаване на ефективността на работния процес на турбината (максималната стойност на к.п.д. се е увеличила с 2.78%). Достигането на съвременните нива на ефективност за турбini от този тип изисква, извън всякакво съмнение, радикална промяна в лопатъчната система на работното колело и (вероятно) на направляващия апарат [2,5].

3. На основата на резултатите от измерванията са определени стойностите на специфичния разход за различните режими на работа и е дефиниран оптималния диапазон за експлоатация на хидроагрегата.

4. Измерванията на налягането на входа на турбината в преходните режими на работа показват умерено [6] нарастване, като по-високите стойности са в режим на спиране. В този режим е измерено максимално нарастване на налягането с 3.892% спрямо налягането при неработеща машина.

## Литература

- [1] Наредба за техническа експлоатация на електрически централи и мрежи (№9/2004).
- [2] Обретенов, В. Водни турбии. Екпрогрес, С., 2008.
- [3] IEC Standard 60041 "Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines. Geneve, 1991.
- [4] IEC Standard 62256: "Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines – Rehabilitation and performance improvement". Edition 1.0, 2008-01.
- [5] Sallaberger, M., Ch. Michaud, H. Born, St. Winkler, M. Peron: Design and manufacturing of Francis runners for rehabilitation projects. Hydro 2001 Conference, Riva del Garda, Italy.
- [6] Trivedi Ch., M.Cervantes, B.Gandhi, O.Dahlhaug. Experimental investigations of transient pressure variations in a high head model Francis turbine during start-up and shutdown. Journal of Hydrodynamics, vol.36, December, 2014.

## За контакти:

Проф. д-р Валентин Славов Обретенов, кат. „ХАД и хидравлични машини“, ТУ-София, тел.: +359 02 965 2333; E-mail: v\_obretenov@tu-sofia.bg.

Докладът е рецензиран.