

Parameterizacija momenta na krmilnem obroču in optimizacija vodilniškega mehanizma cevne turbine

The Parameterization of the Torque on a Regulating Ring and the Optimization of the Guide-Vane Mechanism of a Bulb Turbine

Simon Krotec

Prispevek govori o vodilniškem mehanizmu pri cevnih vodnih turbinah. Vodilniški mehanizem skrbi za vrtenje vodilniških lopat v odvisnosti od vodnih razmer in s tem za optimalno izkoriščanje vodne energije. V prispevku je opisan postopek parameterizacije hidravličnega momenta in optimizacije vodilniškega mehanizma s ciljem zmanjšanja sile, ki jo morata zagotoviti hidravlična valja. Za rešitev te naloge je bil uporabljen programski paket PTC Pro/Engineer (Pro/E) Wildfire, rezultati pa so prikazani v grafični obliki iz katere je razviden rezultat numeričnega optimiranja vodilniškega mehanizma.

© 2004 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

(Ključne besede: turbine cevne, vodilniki, parameterizacija, optimiranje)

This paper deals with the guide-vane mechanism of bulb water turbines. The guide-vane mechanism pivots the guide vanes as a function of the water conditions and thus ensures the optimal use of the water's energy. The guide-vane mechanism of water turbines is driven by one or two hydraulic cylinders. The dimensions of the complete hydraulic system of a power plant are closely connected with the size of the hydraulic cylinders. These two parameters can have a considerable impact on the price of the guide-vane mechanism as well as the price of the hydraulic equipment and finally on the energy that is put into moving the guide-vane mechanism. In this paper the procedure for the parameterization of the hydraulic torque and the optimization of the guide-vane mechanism is described. For solving this task we used the PTC Pro/Engineer (Pro/E) Wildfire software, and the results are shown graphically.

© 2004 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

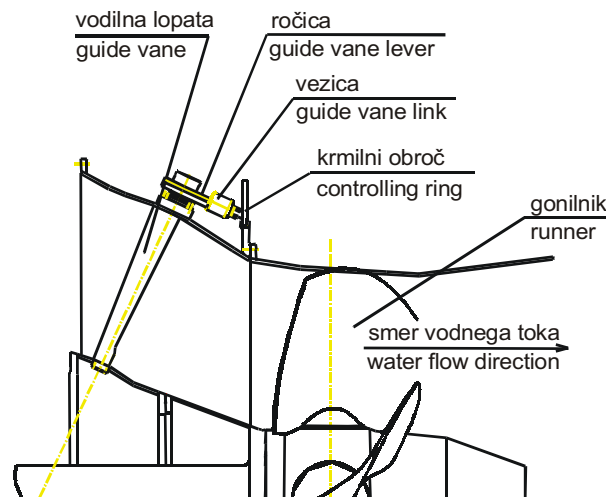
(Keywords: bulb turbines, guide-vane, parameterization, optimization)

0 UVOD

Vodilnik je nameščen pred gonilnikom v smeri pretoka vode (sl.1). Sestavljen je iz več sosredno razporejenih vodilnih lopat in vodilniškega mehanizma, ki ga sestavljajo krmilni obroč, ta se vrti na ravnini, pravokotni na smer vodnega toka, ročice, ki je togo pritrjena na čep vodilniške lopate, ter vezice, ki povezuje krmilni obroč in ročico (sl.1, sl.2). Vodilne lopate skrbijo za pravilno usmerjanje vodnega toka na lopate gonilnika in s tem za najučinkovitejšo spremembo potencialne energije vode v kinetično energijo na lopatah gonilnika. Pri sodobnih turbinah je vodilnik praviloma nastavljen. Tako je mogoče krmiliti pretok vode skozi turbino v širšem obratovalnem področju. V kombinaciji z nastavljivim gonilnikom je tako poskrbljeno za optimalen izkoristek vodne energije. Odprtje vodilnika se nastavlja z uporabo mehanizma, ki je skupaj z vodilniškimi lopatami prikazan na sliki 3. Krmilni obroč je običajno gnan z dvema hidravličnima

0 INTRODUCTION

The guide-vane mechanism is placed ahead of the runner in the water-flow direction (Fig.1). It is composed of many centric distributed guide vanes, a controlling ring, which turns in the plane normal to the water flow, a guide-vane lever (lever), which is rigidly attached to the guide-vane stem and a guide-vane link (link), which connects the controlling ring to the lever (Fig.1, Fig.2). The correct water flow on the runner blades and thus the optimal use of the potential energy of the water to produce kinetic energy on the runner blades is ensured by the correct position of the guide vanes. With modern turbines the guide-vane mechanism is normally adjustable. As a result of this the water flow through the turbine can be controlled, and in combination with adjustable runner blades, the optimal efficiency can be achieved. The guide-vane opening is adjusted by a mechanism. The controlling ring is



Sl. 1. Pretočni trakt cevne turbine
Fig. 1. Water-flow tract of a Bulb turbine

valjema. Hidravlična valja morata zagotoviti dovolj veliko silo, da premagata moment na krmilnem obroču.

Hidravlična sila vode na čepih vodilniških lopat povzroča hidravlični moment, pri vrtenju lopat pa tudi moment trenja v ležajih lopat. Do odvisnosti hidravličnega momenta in momenta trenja na vodilniških lopatah od odprtja vodilnika pridemo z modelnim preizkusom ali numeričnim modeliranjem vodnega toka. Slednje se vsled enostavnosti in cenenosti ter zadovoljive zanesljivosti zadnje čase vse bolj uporablja. Vsota teh dveh momentov se prek ročic in vezic prenese na krmilni obroč. Moment na krmilnem obroču je torej odvisen od odprtja vodilnika.

Za matematični izračun odvisnosti momenta na krmilnem obroču od odprtja vodilnika je bil uporabljen programski paket Pro/E. Za izračun je bilo treba narediti poenostavljen model vodilniškega mehanizma, kot vhodni podatek pa je rabil diagram odvisnosti momentov od odprtja vodilnika na čepu vodilniške lopate. Diagram momentov na čepu vodilniške lopate izračunamo iz podatkov o koeficientu hidravlične sile in momenta na vodilniške lopate, ta je bil v tem primeru pridobljen z modelnim preizkusom [1].

Namen naloge je bil zmanjšanje največjega momenta na krmilnem obroču in s tem zmanjšanje površine bata in prostornine hidravličnega valja. Ta naloga je bila opravljena s programskim paketom Pro/E Wildfire, ki ima vgrajen algoritem za optimizacijo dinamičnih parametrov. Tukaj so kot vhodni podatki rabili začetni moment na krmilnem obroču in začetna dolžina vezice ter ročice, določiti pa je bilo treba tudi število iteracij algoritma glede na zmožnost strojne opreme.

Tovrstna optimizacija je bila uporabljena pri vodilniškem mehanizmu za HE Boštanj.

1 RAZVOJ MODELA MEHANIZMA

Zaradi pogostih zahtev po strojni opremi je bilo treba izdelati poenostavljen model

usually driven by two hydraulic cylinders, which have to provide sufficient force to overcome the torque on the controlling ring.

The hydraulic torque and the friction torque on the guide-vane stem are induced by the hydraulic force of the water flow. During the model test of a turbine or by numerical modeling of the water flow through a turbine (a modern method) as a function of the guide-vane opening, these torques are measured. Their sum is transmitted to the controlling ring over the levers and links. The torque on the controlling ring is dependent on the guide-vane opening.

A computer program called Pro/E was used to perform the mathematical computation of the torque on the controlling ring as a function of the guide-vane opening. For the computation a simplified model of the guide-vane mechanism had to be assembled. A diagram of the sum of torques on the guide-vane stem was used as the initial data. This sum of torques was computed by using coefficients of the hydraulic torque and the hydraulic force. These coefficients were acquired from the model turbine test [1].

The purpose of the task was to minimize the maximum torque on the controlling ring and thus lower the area and the volume of the hydraulic cylinder. The problem was successfully solved by using the computer program called Pro/E Wildfire, which has a built-in algorithm for the optimization of dynamic parameters.

This kind of optimization was used on a guide-vane mechanism for the hydroelectric power plant in Boštanj.

1 DEVELOPMENT OF THE MECHANISM MODEL

Because of the high demand on hardware a simplified model of the mechanism had to be assembled

vodilniškega mehanizma za preliminarne študije različnih rešitev vodilniškega mehanizma (sl.2). Upoštevati je bilo treba ključne izmere vodilnika (sl.3). Te so: začetna dolžina vezice l_r , začetna dolžina ročice l_v , največje relativno odprtje vodilnika a_0 , polmer krmilnega obroča R_o , oddaljenost vrtilišča vodilniške lopate od krmilnega obroča D_o , nagnjenost vodilniške lopate glede na os turbine α , polmer pritrditve ročice na vodilniško lopato R_v in zavrtitev ročice na čepu vodilniške lopate β .

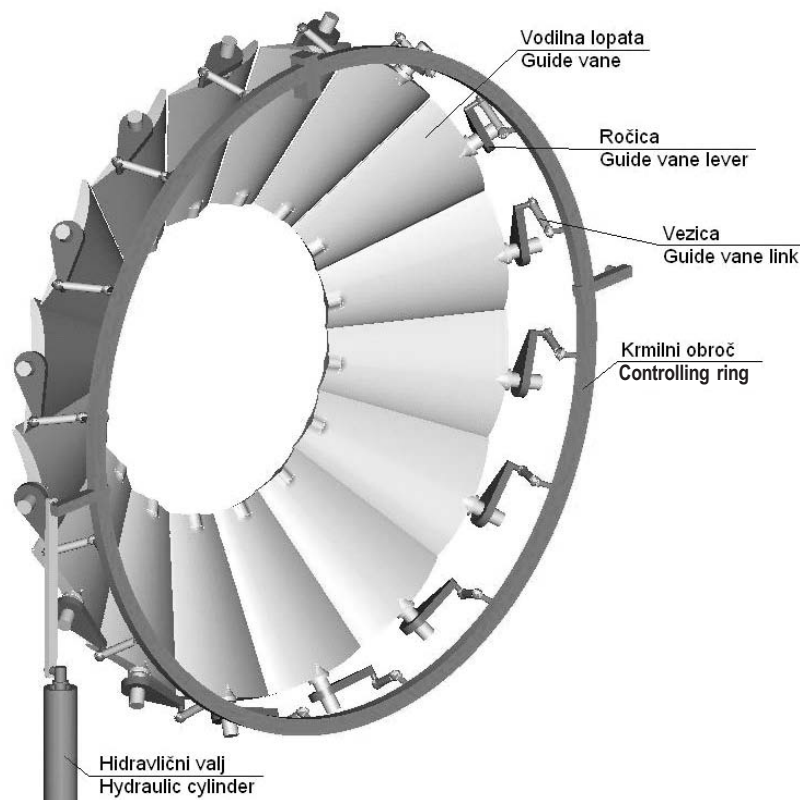
Po teh podatkih smo v programu Pro/E začeli modelirati vodilniški mehanizem. Najprej so bili zmodelirani sestavni deli mehanizma, nato pa so bili s funkcijo, ki jo omogoča program Pro/E, sestavljeni v mehanizem. Pri tem je bilo treba upoštevati dejansko povezavo med konstrukcijskimi elementi. Nato sta bili določeni odprta in zaprta lega mehanizma in s tema dvema legama je bilo omejeno gibanje mehanizma. Zaprta lega je bila določena s stikom dveh sosednjih vodilniških lopat, odprta lega pa z največjim odprtjem vodilnika. Na osi krmilnega obroča je bil določen tudi kinematični pogon s premo odvisnostjo zavrtitve od časa.

Največje odprtje vodilnika je odvisno od izbrane obratovalne točke turbine. Obratovalno točko turbine izberemo na podlagi hidravličnega izkoristka turbine. Tega izračunamo z uporabo podatkov, izmerjenih pri modelnem preizkusu turbine, in sicer:

(Fig.2). The key dimensions of the guide-vane mechanism had to be considered. These are as follows: the initial lever length l_v , the initial link length l_r , the maximum relative guide-vane opening a_0 , the controlling ring radius R_o , the distance between the turning point of the guide vane and the controlling ring D_o , the tilt of the guide vane relative to the turbine centerline α , the radius of the lever attachment on the guide-vane stem R_v and the twist of the lever on the guide-vane stem β .

The modeling of the guide-vane mechanism was begun with the Pro/E software based on this data. At first the components were modeled and then assembled as a mechanism with the aid of a Pro/E function. The real connection between the constructional elements had to be taken into consideration. The open and closed positions of the mechanism were determined after that. The mechanism motion was restricted by these two positions. The closed position was determined by the contact of the two neighbouring guide vanes, while the open position was determined by the maximum opening of the guide-vane mechanism. The axial kinematical drive with a linear time dependence was defined on the axis of the controlling ring

The maximum guide-vane opening is determined by the chosen working-point of the turbine, which is chosen depending on the efficiency of the turbine. The efficiency of the turbine is calculated by using data gathered during



Sl. 2. Poenostavljen model vodilnika
Fig. 2. Simplified model of the guide-vane mechanism

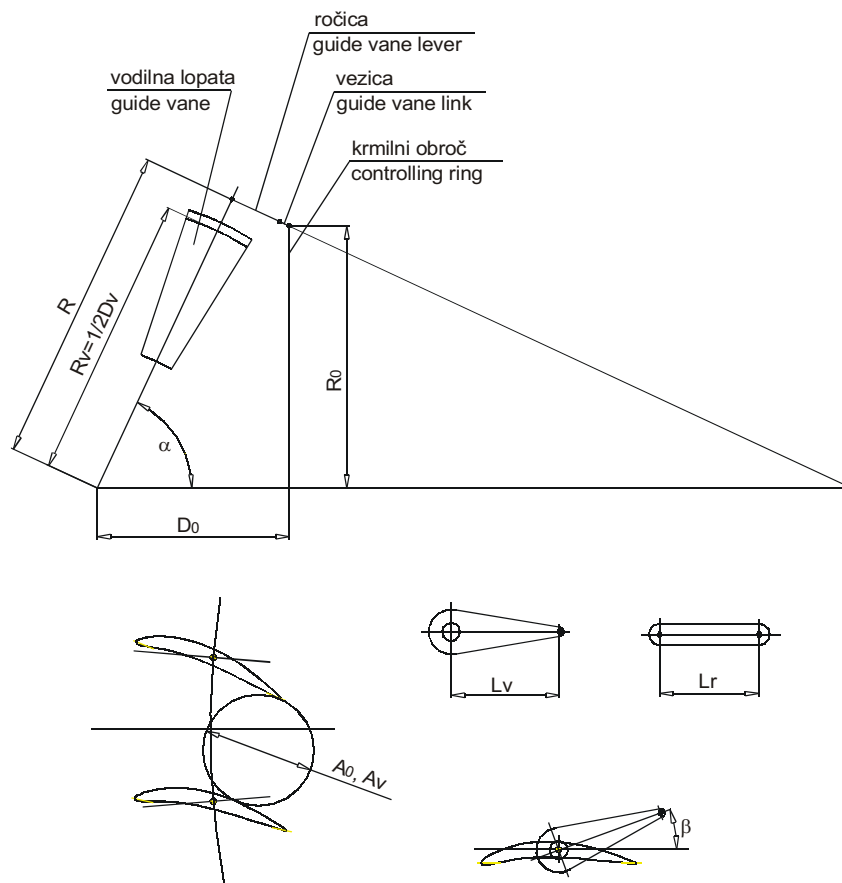
pretoka, moči na gredi turbine, izmerjene tlačne razlike na turbini in izmerjenega prostorninskega pretoka vode skozi pretočni trakt turbine. Pri modelnem preizkusu se izmeri tudi največje odprtje vodilnika a_v , ki je določeno kot najmanjša razdalja med dvema sosednjima vodilniškima lopatama na izbranem vodilnem polmeru R_v (sl.3). Z uporabo teh dveh podatkov izračunamo relativno odprtje a_0 po enačbi:

$$a_0 = \frac{a_v \cdot z}{2 \cdot R_v} \quad (1),$$

kjer je z število vodilniških lopat, ki sestavljajo vodilniški mehanizem. Ker pa relativno odprtje vodilnika velja za vse podobne turbine (turbine iste vrste različnih velikosti z enakimi karakteristikami), je z izbiro vodilnega polmera za vsako turbino iz relativnega odprtja mogoče izračunati tudi odprtje vodilnika.

the model test of the turbine. These data are the water flow, the measured power and the water head. During the model test on the chosen guide radius R_v , the guide-vane opening a_v is also measured. By using these two parameters the relative guide-vane opening a_0 is calculated using the following equation:

where z is the number of guide vanes. The relative opening is valid for all similar turbines (same kind and characteristics, but different size), so by choosing the guide-radius the opening of a guide wheel for every similar turbine can be calculated.



Sl. 3. Ključne izmere vodilniškega mehanizma
Fig. 3. Key dimensions of the guide-vane mechanism

2 PARAMETERIZACIJA MOMENTA

V programu Pro/E je mogoče parameterizirati fizikalne veličine. Statične – geometrijske parametre, kakor so razdalje in koti, določimo intuitivno, tj. neposredno z merjenjem želene izmere, pri dinamičnih, med katere spada tudi moment, pa je treba napisati preglednico veličine v odvisnosti od časa in jo kot dinamični pogon določiti na izbrani osi.

2 PARAMETERISATION OF THE TORQUE

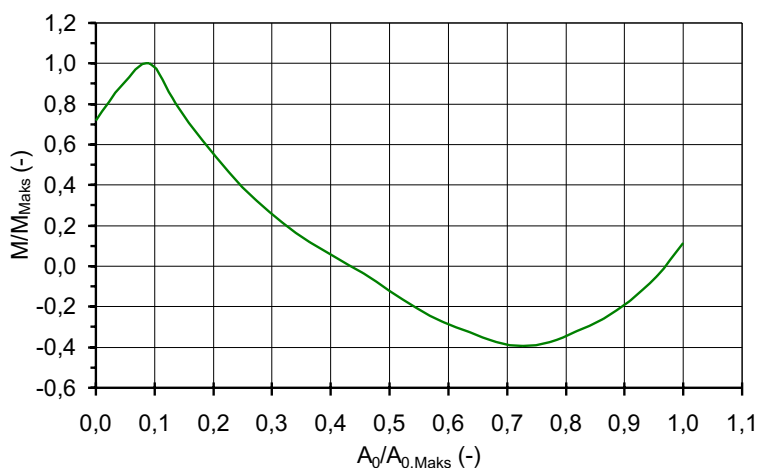
In the Pro/E software the physical quantities can be parameterized. Static parameters like distances and angles are defined intuitively, i.e., directly by measuring the dimensions. Dynamic parameters, including torque, have to be inserted into a program in the form of a table of the quantity as a function of time and defined on an axis as a dynamic drive.

Odvisnost od časa je na prvi pogled nelogična, saj se pri vodilniškem mehanizmu pojavljajo vse veličine v odvisnosti od relativnega odprtja vodilnika. Vendar je posebnost programa Pro/E ta, da je glavni parameter čas. Program izračunava vse parametre v odvisnosti od časa. Če torej uporabnik želi prikazati katerikoli parameter v odvisnosti od poljubno izbranega parametra, mora najprej poiskati odvisnost obeh parametrov od časa.

Pri vodilniškem mehanizmu je bila tako tabelirana vsota hidravličnega momenta in momenta trenja v odvisnosti od časa. Podatki o teh dveh momentih so bili s Turboinštituta [1] podani v odvisnosti od relativnega odprtja vodilnika, zato je bilo najprej treba analizirati odvisnost odprtja vodilnika od časa. Tako smo posredno prišli do odvisnosti vsote momentov od časa. S preglednico vsote momentov je bil definiran dinamični pogon, določen na osi vodilniške lopate, kjer vsota momentov dejansko deluje. Pri analizi mehanizma nato določimo želene parametre reakcij, to so sile, momenti, hitrosti, sunki, ki se jih lahko prikaže v odvisnosti od želenega parametra. Tako dobimo preglednico momenta na krmilnem obroču v odvisnosti od relativnega odprtja vodilnika kot reakcije na vsoto hidravličnega momenta in momenta trenja, ki deluje na osi vodilniških lopat (sl. 4).

The function of time might seem illogical at first glance, but a feature of the program Pro/E is that time is the main variable. The program calculates all the parameters as a function of time. If the user wants to present any parameter as a function of another, the dependence of both parameters on time has to be found first.

A table of the sum of the hydraulic and friction torques as a function of time was created. But the data about these torques were given by the Turboinštitut [1] as a function of the relative guide-vane opening. Therefore, an analysis of the guide-vane opening as a function of time had to be calculated first. This was an indirect route to the sum of torques as a function of time. Dynamic drive was defined on the axis of a guide vane where this sum of torques actually acts. The desired parameters of reactions like forces, torques, impulses etc. are then defined during a mechanism analysis. They can be presented as functions of any defined parameter. Also, the searched torque on the controlling ring as a function of the relative guide-vane opening as a reaction to the sum of torques is calculated (Fig. 4).



Sl. 4. Vsota hidravličnega momenta in momenta trenja na čepih vodilniških lopat kot funkcija relativnega odprtja vodilnika

Fig. 4. Sum of hydraulic and friction torques on the guide-vane stem as a function of the relative opening of the guide wheel

3 OPTIMIZACIJA MEHANIZMA

Vsota hidravličnega momenta in momenta trenja se iz osi vodilniške lopate prek ročice in vezice prenaša na os krmilnega obroča. Krmilni obroč je gnan z enim ali dvema hidravličnima batoma, ki morata moment premagati.

Potek momenta v odvisnosti od relativnega odprtja vodilnika ni prem in se značilno spreminja preko lokalnih vrhov, ki vplivajo na izmere vodilniškega mehanizma (sl. 4). Zaradi lastnosti vodilniškega mehanizma, da je s spreminjanjem dolžin

3 OPTIMIZATION OF THE MECHANISM

The sum of the hydraulic and friction torques is transferred from the guide-vane axis to the controlling ring axis over links and levers. The controlling ring is driven by one or two hydraulic pistons, which have to ensure sufficient force to overcome this torque.

The magnitude of the torque as a function of guide-vane opening is not linear, and because of the nature of the mechanism the magnitude itself can be changed by changing the lengths of the links and

vezice in ročice spreminja tudi potek momentov, se odpira možnost optimiranja odnosno znižanje lokalnih vrhov krivulje momenta. Iskanje najnižje vrednosti vrha krivulje momenta na krmilnem obroču je bilo izvedeno z algoritmi za optimizacijo konstrukcij v programu Pro/E.

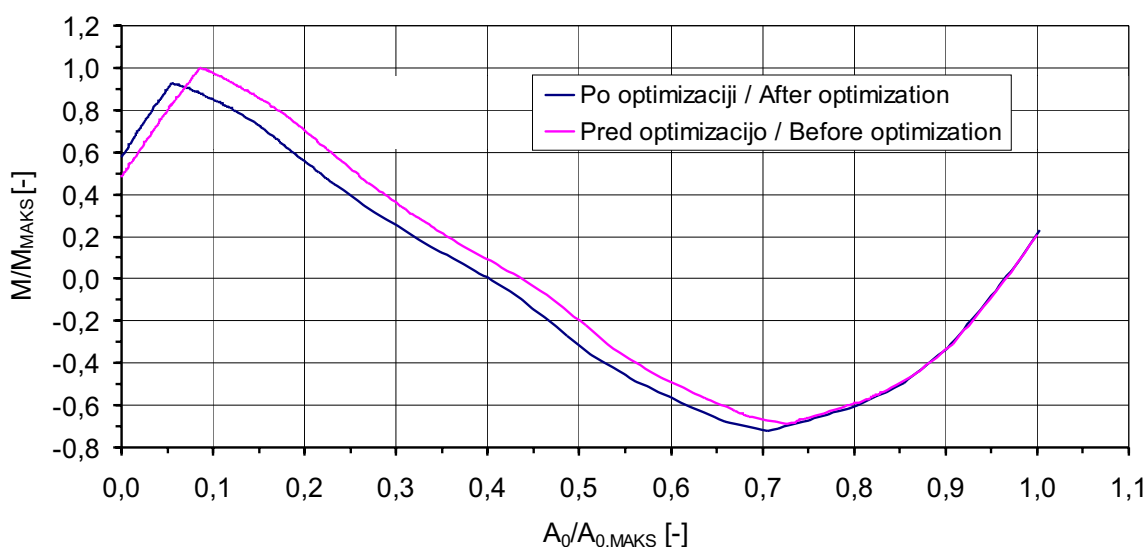
Optimizacija je postopek, ki reši problem najmanjših in največjih vrednosti neke ciljne funkcije ob določenih začetnih pogojih. Večina problemov ima eno samo ciljno funkcijo, obstajajo pa tudi problemi z več ciljnim funkcijami in tudi taki brez ciljne funkcije. Probleme z več ciljnim funkcijami rešujemo s tako imenovanimi večciljnimi metodami, problemi brez ciljne funkcije pa v resnici niso pravi optimizacijski problemi. V ciljni funkciji se pojavljajo spremenljivke, s spreminjanjem le-teh pa je ciljno funkcijo mogoče znižati ali zvišati. V večini primerov pa spremenljivke ne morejo zavzeti poljubne vrednosti. Vrednosti, ki jih lahko zasedejo, pa so predpisane z omejitvami, po navadi z območji števil ali drugimi funkcijami [2].

Pri optimizaciji vodilniškega mehanizma za cevno turbino je bil uporabljen gradientni projekcijski algoritem, ki je eden od algoritmov zvezne optimizacije [2]. Ciljna funkcija je bila funkcija momenta na krmilnem obroču v odvisnosti od relativnega odprtja vodilnika, in sicer taka z najmanjšim vrhom. Spremenljivki sta bili dve. To sta dolžini ročice in vezice. Začetni pogoji, tj. začetni dolžini ročice in vezice sta bili določeni na podlagi dolžin pri vodilniških mehanizmih sedanjih cevni turbini. Omejitev je bila skrajšanje ali podaljšanje vezice in ročice za 15%. Po optimizaciji se je vrh funkcije momenta na krmilnem obroču znatno zmanjšal (sl.5), glede na prvotno stanje za 7 odstotkov. Tako je bila naloga zmanjšanja vrha momenta na krmilnem obroču zadovoljivo rešena.

levers. The Pro/E software has helped once more at finding the lowest maximum value of the torque on the controlling ring, i.e. there is an optimization algorithm built into Pro/E.

Optimization is a process that solves the problem of minimizing or maximizing an objective function for determined initial conditions. Most problems have one objective function, but there are problems with multiple objective functions, and problems with no objective function. Problems with multiple objective functions are solved by using multi-objective design study optimization algorithms. Problems without an objective function, in fact, are not real optimization problems. There are variables in the objective function. By changing the values of variables the maximum or minimum of the objective function can be found. In most problems the variables cannot take on any value. The values that can be taken on by variables are defined by constraints. These constraints are usually intervals or other functions [2].

The gradient projection algorithm, which is one of the continuous optimization algorithms, was used [2]. The torque on the controlling ring as a function of guide-vane opening was chosen as an objective function. There were two variables in the function: the length of the link and the length of the lever. The initial conditions, which are initial lengths, were determined on the basis of experience. The lengths of the levers and links on other turbines were taken into consideration. The constraints were defined by shortening or lengthening the link or the lever, each by 15%. The maximum of the torque as a function of guide-vane opening was reduced by 7% after the optimization. In such a manner the task of reducing the torque on the controlling ring was successfully solved.



Sl. 5. Primerjava momentov na krmilnem obroču pred optimizacijo in po njej

Fig. 5. Comparison of torques on the controlling ring before and after the optimization

4 SKLEP

Zmanjšanje momenta na krmilnem obroču za 7 odstotkov se na prvi pogled ne zdi veliko, vendar pripomore k skupnemu zmanjšanju stroškov za vodilniški mehanizem, prav tako pa za hidravlično opremo. Tudi poraba energije za obratovanje vodilniškega mehanizma je nekoliko manjša. Predvsem pa je rezultat optimizacije tudi spodbuda za nadaljnje delo na tem področju. V programu Pro/E je vgrajen tudi eden od optimizacijskih algoritmov, ki zmore optimizirati več ciljnih funkcij. Tako bi bilo mogoče uporabno optimizirati vodilniški mehanizem z več ciljnimi funkcijami, več spremenljivkami in več omejitvami. To bi bilo predvsem uporabno za vgradnjo elastične vezice, ki zahteva določeno dolžino. Mehanizem pa bi optimizirali z oddaljenostjo krmilnega obroča od vrtišča vodilnih lopat.

4 CONCLUSIONS

A reduction of the torque on the controlling ring by 7% does not look like much, at first. But it does reduce the cost of a guide wheel and the hydraulic equipment. The energy consumption for operating the guide wheel is also reduced. Another of the results of the successful optimization is the stimulation for further work in this area. This would be with multi-objective optimization, which can also be performed in Pro/E. Optimizing of the mechanism with several objective functions with more variables and more constraints would be useful, primarily for building in an elastic guide-vane link that requires its own length. The distance of the controlling ring from the pivot point of the guide vanes would be optimized in this case.

5 OZNAČBE
5 SYMBOLS

dolžina vezice	l_R	link length
dolžina ročice	l_V	lever length
relativno odprtje vodilnika	A_0	relative guide-vane opening
odprtje vodilnika	A_V	guide-vane opening
polmer krmilnega obroča	R_O	radius of controlling ring
oddaljenost vrtišča vodilniške lopate od krmilnega obroča	D_O	distance from guide-vane pivot point to centre of the controlling ring
nagnjenost vodilniške lopate glede na os turbine	α	tilt of the guide vane upon the turbine centreline
polmer pritrditve ročice na vodilniško lopato	R_V	radius of the lever attachment to the guide vane
zavrtitev ročice na čepu vodilniške lopate	β	angle of the lever on the guide-vane stem
število vodilniških lopat v mehanizmu	z	number of guide vanes in the guide-vane mechanism

6 LITERATURA
6 REFERENCES

- [1] Poročilo modelnega preizkusa cevne turbine (Report on model turbine test), *Turboinštitut*, Ljubljana 2003
 [2] <http://www-fp.mcs.anl.gov/otc/Guide/OptWeb/opt.html>

Avtorjev naslov: Simon Krotec
 Litostroj E.I. d.o.o.
 Litostrojska 40
 1000 Ljubljana
 simon.krotec@litostroj-ei.si

Author's Address: Simon Krotec
 Litostroj E.I. Ltd.
 Litostrojska 40
 1000 Ljubljana, Slovenia
 simon.krotec@litostroj-ei.si

Prejeto: 12.2.2004
 Received:

Sprejeto: 30.9.2004
 Accepted:

Odprto za diskusijo: 1 leto
 Open for discussion: 1 year