

MÔ HÌNH HÓA VÀ TỐI ƯU NĂNG LƯỢNG CHO HOẠT ĐỘNG CỦA HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN QUÁ TRÌNH CÔNG NGHỆ CÓ NHIỀU BƠM HOẠT ĐỘNG SONG SONG

Nguyễn Đức Trung, Nguyễn Ngọc Hoàng

Viện Công nghệ sinh học - Công nghệ thực phẩm, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

Ngày nhận bài 14/7/2017, ngày nhận đăng 13/10/2017

Tóm tắt: Số lượng tổ hợp động cơ - bơm tham gia hoạt động và trị số dòng công suất cấp cho từng tổ hợp để đạt lưu lượng đặt theo yêu cầu của quá trình công nghệ là hai thông số cần được tìm ra trong bài toán tối ưu năng lượng của hệ thống nhiều bơm hoạt động song song. Hệ thống được mô tả toán học và mô phỏng bằng phần mềm 20 - Sim với ngôn ngữ Bondgraph chuyên dụng trong việc mô tả chế độ xác lập và quá độ của hệ thống biến đổi năng lượng đa lĩnh vực (điện - cơ - thủy lực). Bài toán tối thiểu năng lượng tiêu thụ được chuyên hóa thành bài toán tối đa hiệu suất biến đổi năng lượng có công suất thủy lực không đổi với thông số cố định của tải thủy lực cho trước. Vấn đề được giải quyết dựa vào đặc tính hiệu suất biến đổi năng lượng của toàn hệ thống theo công suất điện cấp.

1. Đặt vấn đề

Nhìn nhận ở góc độ hệ thống điều khiển quá trình công nghệ, hệ thống bơm cũng như các loại van đóng vai trò cơ cấu chấp hành trong việc điều chỉnh lưu lượng các chất lỏng. Tiết lưu dòng chảy bằng van thường gây ra tổn thất về mặt năng lượng cũng như giảm tuổi thọ của bơm khi áp suất đầu bơm bị đẩy lên cao hơn định mức, trở lực bị tăng lên trong trường hợp không phối hợp với hệ thống điều chỉnh tốc độ động cơ truyền động bơm. Nhằm đáp ứng nhu cầu trên, các hệ thống biến tần thường được tích hợp với hệ động cơ truyền động bơm. Việc điều chỉnh lưu lượng dòng chảy vật chất vào quá trình được thực hiện bằng điều chỉnh tốc độ bơm theo một tỷ lệ tương quan có tính đồng biến giữa lưu lượng ra khỏi bơm và tốc độ truyền động bơm. Tỷ lệ đồng dạng tuyến tính của lưu lượng và tốc độ trình bày trong nhiều tài liệu thiết kế bơm đã không chỉ rõ phạm vi áp dụng cho tải có phân áp suất thủy tĩnh thấp hoặc cho tải thủy lực rất nhỏ (trường hợp lưu lượng ra cực đại Q_{max} của thiết kế). Nguyên tắc này không áp dụng được trong các trường hợp tải thủy tĩnh (phần áp suất thủy tĩnh lớn như bơm đẩy chất lỏng lên vị trí cao hơn, cấp cho hệ thống lọc màng có áp suất thẩm thấu lớn) [2, 5]. Trong thiết kế hệ thống, các bơm này thường được lựa chọn giống nhau về chủng loại. Bơm (pump), động cơ (motor) và bộ biến tần (variable frequency) được tích hợp thành bộ và được gọi chung là tổ hợp VF/M/P (gọi tắt là tổ hợp). Kết nối song song của các tổ hợp VF/M/P không được hiểu là sự kết nối song song về mặt điện học của biến tần hoặc về mặt cơ học của động cơ mà được hiểu là sự kết nối song song của các bơm về mặt thủy lực trước khi cấp ra tải thủy lực. Các nghiên cứu thường tách biệt bài toán tối ưu năng lượng cho hoạt động của bơm hoặc động cơ nên việc mô hình hóa và tối ưu hóa hệ thống thường không được quan tâm thực hiện toàn diện như các chi tiết được trình bày trong nghiên cứu này.

Email: trung.nguyenduc@hust.edu.vn (N. Đ. Trung)

2. Mô hình hóa, mô phỏng hệ thống nhiều bơm hoạt động song song

2.1. Mô hình hóa các phần tử: bơm ly tâm và hệ biến tần - động cơ

Mô hình toán học của bơm ly tâm khi bỏ qua tổn thất được viết lại dưới dạng hệ phương trình (1-2) dựa trên nguyên lý tam giác vận tốc và định luật bảo toàn năng lượng trong biến đổi cơ - thủy lực cùng các hệ số a, b của bơm [1, 2]:

$$T_p = (a\Omega + bQ_p)Q_p \quad (1)$$

$$P_p = \frac{T_p \Omega}{Q_p} = (a\Omega + bQ_p)\Omega \quad (2)$$

Khi xét đến các tổn thất gây ra bởi hệ số ma sát cơ học f_p trên ổ đỡ hoặc vòng bi của trục truyền động tới bơm; hệ số c do hiệu ứng ma sát thủy lực cục bộ của cánh guồng, thân bơm, các chi tiết khác với dòng lưu chất thì mô hình được viết lại như sau:

$$T_p = (a\Omega + bQ_p)Q_p + f_p \Omega \quad (3)$$

$$P_p = (a\Omega + bQ_p)\Omega - cQ_p^2 - P_0 \quad (4)$$

Bộ tham số đặc trưng a, b, c, P_0 trong hệ phương trình (3-4) được xác định từ thông số hình học của bơm ly tâm: bán kính ngoài và độ dày của cánh guồng; góc nghiêng cánh (cửa vào và cửa ra); trọng lực riêng của lưu chất được bơm. Chế độ xác lập của động cơ điện xoay chiều không đồng bộ ba pha rô-to lồng sóc được mô tả toán học bởi hệ phương trình dưới đây [6]:

$$\omega_e = \omega_r + \omega_{sl}(T_{em}, \lambda_f) = \frac{P_M}{2} \Omega + \frac{4R_r L_m T_{em}}{3P_M L_r \lambda_{fM}^2} = \frac{P_M}{2} \Omega + \frac{4R_r L_m [T_p + (f_M + f_p)\Omega]}{3P_M L_r \lambda_{fM}^2} \quad (5)$$

$$V_{qs}^e = \left(R_s + \frac{L_m^2}{L_r^2} R_r \right) i_{qs}^e(T_{em}, \lambda_{fM}) + \omega_e \sigma L_s i_{ds}^e(\lambda_{fM}) + \omega_r \frac{L_m}{L_r} \lambda_f = V_{qs}^e(\Omega, T_p, \lambda_{fM}) \quad (6)$$

$$V_{ds}^e = \left(R_s + \frac{L_m^2}{L_r^2} R_r \right) i_{ds}^e(\lambda_{fM}) - \omega_e \sigma L_s i_{qs}^e(T_{em}, \lambda_{fM}) - R_r \frac{L_m}{L_r^2} \lambda_{fM} = V_{ds}^e(\Omega, T_p, \lambda_{fM}) \quad (7)$$

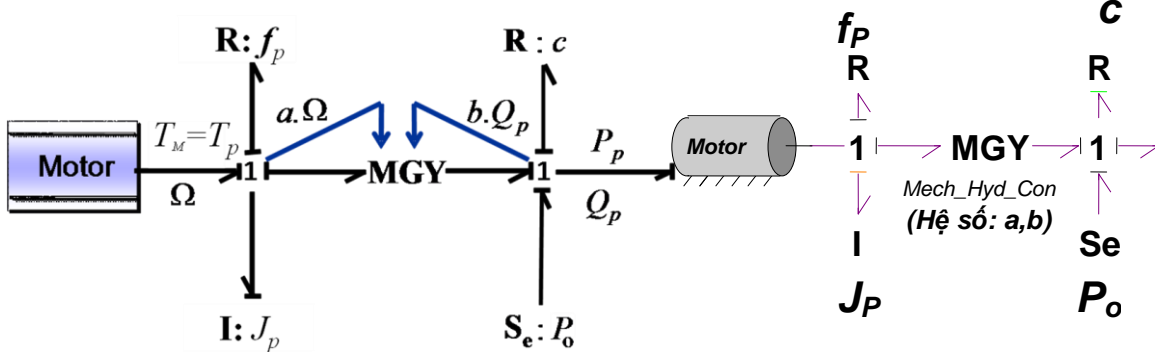
$$P_{In} = \frac{3}{2} \left[V_{qs}^e(\Omega, T_p, \lambda_{fM}) i_{qs}^e(T_p, \lambda_{fM}) + V_{ds}^e(\Omega, T_p, \lambda_{fM}) i_{ds}^e(\lambda_{fM}) \right] \stackrel{\lambda_{fM} = \lambda_M^{Rated} = const}{=} P_{In}(\Omega, T_p) \quad (8)$$

Hiệu suất hệ thống được tính toán bằng tỷ số giữa năng lượng thủy lực (Out) tạo ra từ bơm lên tải thủy lực của hệ thống cho trước có tham số (H_0, K) với điện năng (In) cấp cho các động cơ truyền động bơm. Hệ thức này có thể tính theo công suất tức thời tại chế độ xác lập:

$$\eta_{Motor_Pump} = \frac{W_{Out}^{\Sigma}}{W_{In}^{\Sigma}} = \frac{P_{Out}^{\Sigma stab}}{P_{In}^{\Sigma stab}} = \frac{P_{Hyd}(Q_p)}{P_{E_M_A}^{\Sigma stab}} = \frac{P_p Q_p}{n_p \times P_{E_M}^{\Sigma stab}} = \frac{(\rho g H_0 + K Q_p^2) \cdot Q_p}{n_p \times P_{E_M}^{\Sigma stab}} \quad (9)$$

trong đó: n_p là số tổ hợp được cấp cùng giá trị công suất điện cấp P_{E_M} tại một thời điểm ở chế độ xác lập.

2.2. Thiết lập sơ đồ và tham số mô phỏng



Hình 2.1.a: Biến đổi cơ - thủy lực của bơm ly tâm bằng ngôn ngữ Bond Graph

Hình 2.1.b: Mô phỏng bơm ly tâm trên phần mềm 20 - Sim

Phần mềm 20 - Sim dựa trên nền ngôn ngữ Bond Graph rất thích hợp với việc mô phỏng các hệ thống phức hợp xảy ra đồng thời nhiều quá trình chuyển hóa năng lượng và chuyển hóa vật chất ở cả quá trình xác lập và quá trình quá độ [3]. Ngôn ngữ trực quan gắn với đối tượng vật lý thể hiện qua các cặp biến quá trình điện (áp/dòng), cơ (mô men/vận tốc góc), thủy lực (áp suất/lưu lượng) như mô tả trên Hình 2.1.a và Hình 2.1.b.

Bộ ba tổ hợp có mã hiệu CRN 5-20 của hãng Grundfos được lắp đặt song song có thông số định mức: công suất (3,0 kW), tốc độ cánh guồng (2881v/p), $P=103$ (m); $Q=5,7$ (m³/h). Bộ tham số viết theo đơn vị SI lần lượt là: $a(14,52)$; $b(131 \cdot 10^9)$; $c(0,45)$; P_o (2595). Nước là chất lỏng được lựa chọn cho các mô phỏng. Đặc tính tải trong các trường hợp được liệt kê như bảng sau:

Bảng 2.1: Thông số của tải thủy lực số (H_0, K) trong các trường hợp mô phỏng

Thông số của tải thủy lực: $P = \rho \cdot g \cdot H_0 + K \cdot Q^2$	TH_1	TH_2	TH_3	TH_4
Cột áp tĩnh H_0 (m)	30	30	30	70
Hệ số ma sát thủy lực K (Ns ² /m ⁵)	$3 \cdot 10^{10}$	$10 \cdot 10^{10}$	$7 \cdot 10^{10}$	$3 \cdot 10^{11}$

3. Tối ưu điện năng tiêu thụ cho hệ thống nhiều bơm hoạt động song song

3.1. Đặt vấn đề

Các hệ thống điều khiển quá trình thường yêu cầu tạo ra áp suất hoặc lưu lượng ổn định theo điểm đặt của chế độ chuẩn công nghệ. Với một tải thủy lực có bộ tham số (H_0, K), công suất thủy lực hình thành sẽ là hằng số với lưu lượng được ổn định tại giá trị đặt nên bài toán tối ưu điện năng có thể thực hiện dựa trên hàm mục tiêu là hiệu suất hệ thống như phương trình (9) với ràng buộc thông số theo yêu cầu công nghệ không đổi. Hàm công suất thủy lực ở đầu ra của bơm đến đường ống là hàm đồng biến của lưu lượng và áp suất, mặt khác hàm công suất điện năng tiêu thụ trên các động cơ cũng là hàm đồng biến của tốc độ góc và mô men nên bài toán được chuyển hóa thành tối ưu hiệu suất hệ thống với công suất điện năng cấp vào và đặc tính tải thủy lực cố định.

Hệ thống có n_p tổ hợp song song hoạt động được cấp từ công suất tổng P_Σ tại một thời điểm đạt lưu lượng lớn nhất khi các tổ hợp có cùng một điểm làm việc hay công suất được chia đều cho các tổ hợp ($P_i = P_\Sigma / n_p$) như chứng minh trong nghiên cứu [6]. Nhiệm vụ

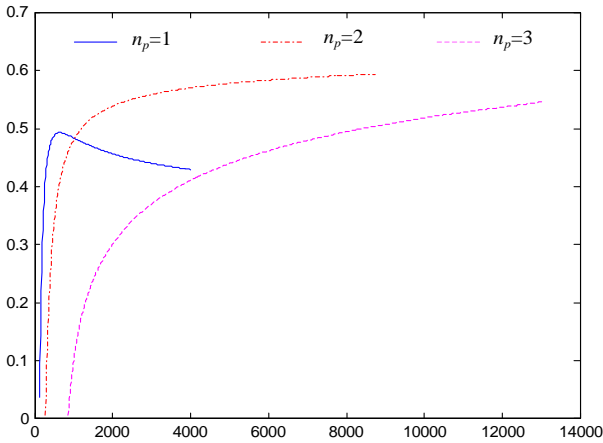
tối ưu là tìm tham số nguyên n_p trong đoạn từ 1 đến N (số tổ hợp song song). Trong nghiên cứu này, hệ số N được chọn là 3. Bài toán tối ưu được chuyển hóa sang việc khảo sát đặc tính hoạt động của hệ thống theo n_p và các dạng tải thủy lực khác nhau tương ứng với các vùng giới hạn P_{LIM} của công suất sử dụng hiệu quả ước tính như sau:

$$n_p P_{MAX} \geq P_{LIM} \geq n_p P_{MIN} \tag{10}$$

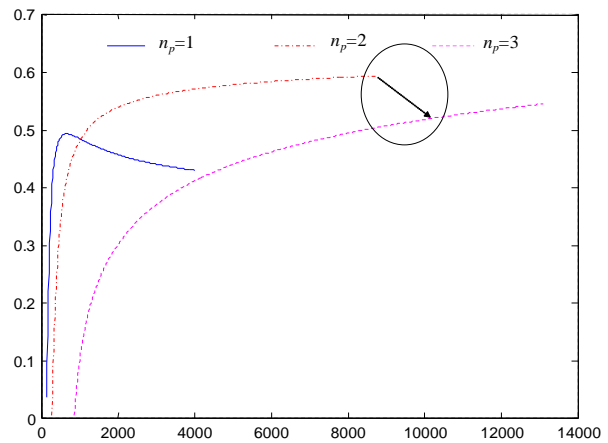
Các hệ số P_{MAX} , P_{MIN} lần lượt là trị số lớn nhất và nhỏ nhất của công suất điện năng cấp vào để bơm có thể hoạt động bình thường. P_{MAX} , P_{MIN} được ước lượng và tính toán trước dựa vào tham số của từng tổ hợp và tham số của tải thủy lực chung.

3.2. Đặc tính hiệu suất theo công suất điện năng cấp vào và số tổ hợp hoạt động

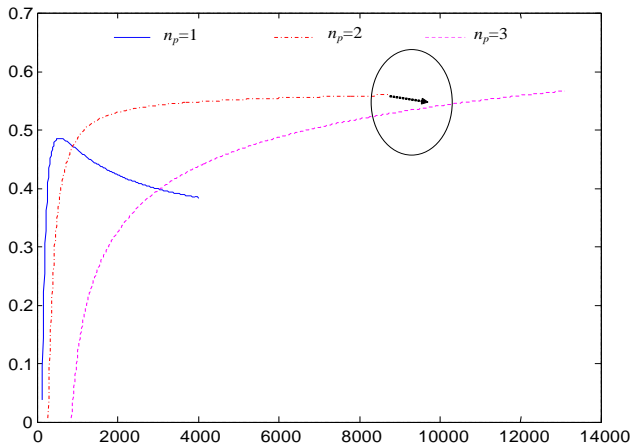
Kết quả khảo sát theo tải thủy lực có tham số ở Bảng 2.1 (TH_1 đến TH_4) được biểu diễn bằng các đặc tính ở Hình 3.1 đến Hình 3.4 với trục hoành, trục tung lần lượt là giá trị công suất điện năng (W) được cấp vào hệ thống và hiệu suất của hệ thống.



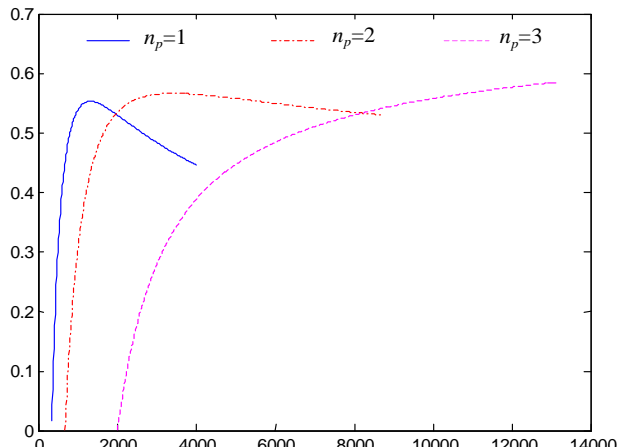
Hình 3.1: Hiệu suất hệ thống trong TH_1



Hình 3.2: Hiệu suất hệ thống trong TH_2



Hình 3.3: Hiệu suất hệ thống trong TH_3

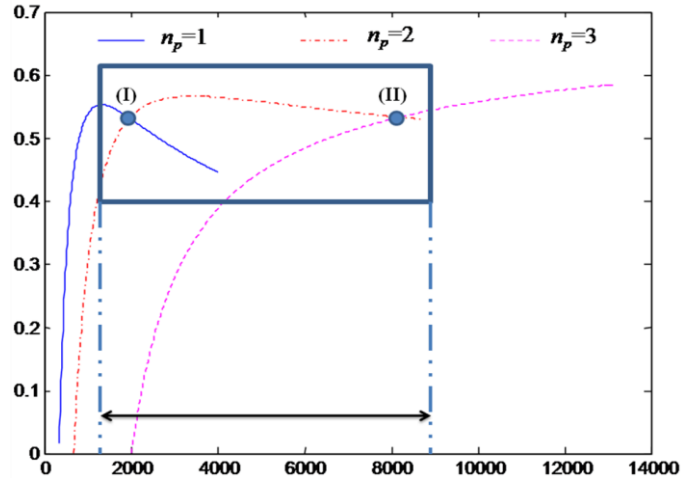


Hình 3.4: Hiệu suất hệ thống trong TH_4

Các trường hợp TH_1 đến TH_3 có sự chuyển tiếp gián đoạn của các đặc tính khi chuyển số lượng các tổ hợp được song song tham gia hoạt động từ 2 sang 3. Trong các trường hợp này, việc bổ sung thêm một bộ ước lượng tính toán lưu lượng ra trên tải thủy

lực là cần thiết để xác định rõ ràng điểm chuyển đổi. Trên thực tế, hiệu suất tại các vùng chuyển đổi không có sự chênh lệch lớn nên giải pháp thường được sử dụng thay thế cho các trường hợp này là giữ nguyên số lượng tổ hợp tham gia hoạt động với mục đích hạn chế sự khởi động và dừng tổ hợp tham gia hoạt động, từ đó hạn chế hiện tượng quá độ với biên độ lớn của hệ thống ở cả phần điện và thủy lực.

Trên Hình 3.4, các đặc tính hiệu suất hệ thống có sự chồng lấn rõ rệt. Chi tiết hóa được thể hiện trên Hình 3.5 (dải công suất được cung cấp ứng với hiệu suất hệ thống cực đại) như sau: dưới 1.800 W ứng với $n_p = 1$; từ 1.800 W đến 8.000 W ứng với $n_p = 2$ và từ 8.000 W trở lên ứng với $n_p = 3$.



Hình 3.5: Vùng hoạt động có sự khác biệt rõ rệt về số lượng tổ hợp hoạt động (TH_4)

Vai trò của tối ưu điện năng tiêu thụ thể hiện rõ nét trong dải công suất đầu vào từ 1200 W đến 9000W với nhiều phương án về số lượng tổ hợp song song hoạt động n_p . Tuy nhiên để đạt hiệu suất cực đại, n_p cần được thay đổi tại các điểm chuyển (I và II).

Nhìn nhận một cách rõ rệt khi so sánh bốn trường hợp thì vai trò nổi bật của sự tối ưu điện năng tiêu thụ đối với các tải thủy tĩnh có áp suất tĩnh lớn; hay nói cách khác, các tải bơm lên cao có áp suất tĩnh lớn, các tải thẩm thấu ngược (RO) có áp suất thẩm thấu lớn. Ý nghĩa của tối ưu thiết kế được thể hiện rõ ràng hơn trong việc tiết giảm điện năng tiêu hao ở các nhà máy có nhiều bơm công suất lớn.

4. Kết luận

Trên thực tế, vấn đề tối ưu năng lượng tiêu hao ứng với một yêu cầu cụ thể của tham số công nghệ (cần ổn định lưu lượng hoặc ổn định áp suất) hay vấn đề tối đa hóa lưu lượng với một nguồn công suất có sẵn (trị số công suất của nguồn hoàn toàn có thể thay đổi trong một phạm vi rộng như trường hợp nguồn năng lượng tái tạo phụ thuộc vào điều kiện của thời tiết) đều có thể quy về bài toán đã phân tích trên mục 3.1 và được giải đáp trên mục 3.2. Dựa trên các đặc tính được xây dựng cho trường hợp tải cụ thể, điểm làm việc tối ưu của hệ thống điều khiển quá trình công nghệ cần ổn định lưu lượng hoặc áp suất hoặc tối đa hiệu suất trong trường hợp nguồn công suất hữu hạn.

Từ kết quả về bài toán tối ưu đã thực hiện, nhiệm vụ thiết kế hệ thống cần xác định hợp lý số lượng tổ hợp song song, ví dụ: ta có thể lựa chọn bộ 5 tổ hợp 1,5 kW mắc

song song cho tải thủy lực có áp suất thủy tĩnh lớn với yêu cầu công suất đặt 7,5 kW nhằm giảm tiêu hao năng lượng tiêu thụ khi điều chỉnh lưu lượng, đồng thời nâng cao tính tin cậy hệ thống khi một trong các tổ hợp bị lỗi.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Carsten Skovmose Kallesøe et al, *Model based fault detection in a centrifugal pump application*, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 14, No 2, 204-215, 2006.
- [2] Gülich Johann Friedrich, *Centrifugal Pumps, Second edition*, ISBN 3642128238. Springer-Verlag. 2010.
- [3] Samantaray, Arun Kumar, Ould Bouamama, Belkacem, *Model-based Process Supervision - A Bond Graph Approach*, ISBN 978-1-84800-158-9, Springer-Verlag London, 2008.
- [4] Seung-Ki Sul, *Control of Electric Machine Drive Systems*, John Wiley & Sons, New Jersey, 2011.
- [5] Europump & the Hydraulic Institute, *Variable Speed Pumping: A Guide to Successful Applications*, ISBN-10: 1856174492, ISBN-13: 978-1856174497, Elsevier Science. 2004.
- [6] Trung Nguyen Duc, *Optimal sizing and system management of water pumping and desalination process supplied with intermittent renewable sources*, INP de Toulouse PhD Dissertation, France, 2013.

SUMMARY

MODELLING AND ENERGY OPTIMIZATION FOR PROCESS CONTROL SYSTEM OF MULTI PUMPS CONNECTED IN PARALLEL

Number of active motorpump combinations and value of dispatched power for each combination to obtain set flow of liquid established by the demand of technology process are two necessarily found parameters in the optimization problem of system of multi pumps connected in parallel. System is modeled and simulated by 20 - Sim software with Bondgraph language which is specialized to describe stable and transient states of multidisciplinary energy conversion system (electric - mechanic - hydraulic). The minimization of energy consumption is transformed to the maximization of energy conversion efficiency with fixed hydraulic power of constant parameters of given hydraulic load. Problem is solved by characteristic of energy conversion of the whole system due to the value of supplied electrical power flow to the system.