

Борис РАБАЛКО

Кафедра автоматизированного
электропривода
Криворожского горнорудного
института, СССР

Вальдемар КЕМПСКИ

Институт Электрификации и
Автоматизации Горного Дела
Силезского политехнического
института, ПНР

МЕТОДИКА И ПРОГРАММА ИССЛЕДОВАНИЯ СКОРОСТНЫХ,
МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЧАСТОТНОРЕГУЛИРУЕМОГО АСИНХРОННОГО ПРИВОДА

Резюме. В статье представлены методика и программа, позволяющие строить зависимости угловой скорости, токов, К.Д., cos ϕ от момента для заданной частоты выходного напряжения, преобразователя. По точкам равных моментов могут быть построены зависимости в функции скорости или в функции частоты напряжения преобразователя. Предусмотрены возможность введения обратной связи по скорости и возможность задания требуемого закона регулирования U/f . Методика ориентирована для применения при экономическом обосновании и для использования в учебном процессе. Пользование программой заключается в подготовке и вводе исходных данных.

Введение

Познавательной целью методики является ознакомление на конкретных примерах со скоростными, механическими и энергетическими характеристиками частотнорегулируемого асинхронного привода, а также оценка влияния на энергетические показатели закона регулирования /отношения U/f /, коэффициента форсирования при введении обратной связи по скорости, конструктивных параметров двигателя. Такие исследования позволяют более обоснованно выбрать тип преобразователя, его мощность и другие параметры исходя не только с позиций удовлетворения требований по напряжению, току и частоте, но и с позиций экономической эксплуатации. Примером могут быть

компромиссные решения между стремлением снизить мощность двигателя и преобразователя с целью снижения капитальных затрат и между стремлением завязать мощность преобразователя для уменьшения внутреннего сопротивления и тем самым для уменьшения эксплуатационных потерь, увеличения перегрузочной способности и т.д.

Вместе с этим, громоздкость зависимостей /см. формулы/ и количество переменных /в представленной методике учтены 12 режимных переменных/ исключают возможность визуальной оценки даже характера взаимосвязи ряда переменных. Представленная программа позволяет исследовать зависимость выходных и промежуточных переменных

S , i_1 , i_2' , Φ , i_μ , M_K , β_K , V_K , η , $\cos \varphi$ от параметров преобразователя и двигателя R_1 , X_1 , R_2' , X_2' , P_n , V_n , f , n и режима работы - закона регулирования ξ_{rp}/U_{rp} нагрузки M , заданной угловой скорости V

Как правило расчёт и исследование характеристик системы привода ПЧ - АД производится при допущении, что двигатель питается от преобразователя бесконечной мощности. Т.к. в работе не ставится задача раздельного исследования потерь в двигателе и в преобразователе, а ставится задача исследования энергетических показателей системы привода, то сопротивление преобразователя можно учесть путём приведения его к цепи статора двигателя и последующим суммированием с собственным сопротивлением статора. Это позволяет использовать формулы для двигателя, питаемого от сети неограниченной мощности.

Программа написана на языке ФОРТРАН 4. Результаты исследований печатаются в виде трёх таблиц размером 10 x 5 значений. Для удобства пользования одновременно с результатами печатаются исходные данные. Пример результата исследований представлен в табл. Программа представлена в табл.

1. Принятые допущения

Для наиболее полного выявления предельных возможностей асинхронной машины, достаточно простого получения основных закономерностей и обоснования наиболее целесообразной структуры системы автоматического управления, приняты допущения, по существу сводящие преобразователь к регулируемому источнику синусоидальной э.д.с.

/или тока в случае инвертора тока/ с неограниченной мощностью. В § I /показано, что при наличии в напряжении на двигателе напряжения лишь нечётных гармоник, кроме третьей и кратных ей, максимальный момент двигателя уменьшается на 1 - 2 % как при питании от инвертора напряжения, так и от инвертора тока. При этом ток при номинальной нагрузке возрастает приблизительно на 1 - 2% для

инвертора напряжения и на 2 - 4 % для инвертора тока, чему соответствует увеличение потерь в меди обмоток /без учёта эффекта вытеснения тока/ на 2 - 4 и на 4 - 8 %.

Потери в стали не зависят от формы напряжения и определяются только частотой и максимальным значением индукции. Поэтому дополнительные потери в стали имеют место лишь в том случае, когда амплитуда первой гармоники напряжения меньше амплитуды несинусоидального напряжения. Но и в этом случае потери в стали возрастают незначительно, примерно на 2 - 3%, а КПД двигателя снижается лишь на несколько десятых долей процента. Это даёт основание вообще не учитывать добавочные потери в стали от несинусоидальности напряжения. Увеличение потерь в стали и меди обмоток приводит к снижению КПД двигателя с учётом эффекта вытеснения тока на 1 - 2% для инвертора тока.

Таким образом, формулами для синусоидальности напряжения могут быть описаны с максимальной погрешностью до 5% статические характеристики двигателя при питании его от преобразователя частоты, являющихся источниками напряжения, содержащих нечётные гармоники, кроме третьей и кратных ей. При питании двигателя от инвертора тока точность такого описания несколько ниже.

Использование соотношений для синусоидального напряжения позволяет существенно упростить расчётные формулы при сохранении достаточной точности. При необходимости уточнить расчёты, особенно энергетические, можно воспользоваться одной из методик, разработанных на базе гармонического анализа и позволяющих учесть влияние высших гармоник на статические характеристики двигателя.

2. Основные соотношения для асинхронного двигателя при частотном управлении

Относительная частота статора

$$\alpha = F_1 / F_{1 \text{ ном}} \quad (1)$$

где: F_1 - частота тока статора, Гц;

$F_{1 \text{ ном}}$ - номинальная частота тока статора, Гц;

Абсолютное скольжение или относительная частота ротора

$$\beta = (V_{1 \text{ ном}} - V) / V_{1 \text{ ном}} = 1 - \alpha(1 - S) \quad (2)$$

где: α - угловая скорость ротора, р/с;

S - скольжение.

Относительное напряжение

$$\delta = U / U_{1 \text{ ном}} \quad (3)$$

Коэффициенты рассеяния статора и ротора

$$T_a = X_1/X_0, \quad T_2 = X_2'/X_0 \quad (4), (5)$$

Общий коэффициент рассеяния

$$T = T_1 + T_2 + T_1 \cdot T_2 \quad (6)$$

Промежуточные параметры

$$B = R_1(1 + T_2) \quad (7)$$

$$C = X_0 T \quad (8)$$

$$D = R_1/X_0 \quad (9)$$

$$E = 1 + T_a \quad (10)$$

Электромагнитный момент двигателя

$$M = \frac{m_1 \cdot U_n^2 \cdot \delta^2}{V_{0 \text{ макс}} (2R_1 \alpha + (B^2 + C^2 \alpha^2) \beta / R_2' + (D^2 + E^2 \alpha^2) R_2' / \beta)} \quad (11)$$

Ток статора

$$I_1 = U_n \cdot \delta \sqrt{\frac{R_2'^2 / X_0^2 + (1 + T_2)^2 \beta^2}{2R_1 R_2' \alpha \beta + (B^2 + C^2 \alpha^2) \beta^2 + (D^2 + E^2 \alpha^2) R_2'^2}} \quad (12)$$

Приведенный ток ротора

$$I_2' = U_n \cdot \delta \cdot \beta / \sqrt{2R_1 R_2' \alpha \beta + (B^2 + C^2 \alpha^2) \beta^2 + (D^2 + E^2 \alpha^2) R_2'^2} \quad (13)$$

Магнитный поток в воздушном зазоре

$$\Phi = \frac{U_n \cdot \delta}{C_1 F_{\text{пол}}} \sqrt{\frac{R_2'^2 + X_2'^2 \beta^2}{(B^2 + C^2 \alpha^2) \beta^2 + 2R_1 R_2' \alpha \beta + (D^2 + E^2 \alpha^2) R_2'^2}} \quad (14)$$

Ток намагничивания

$$I_m = U_n \cdot \delta \sqrt{\frac{R_2'^2 / X_0^2 + T_2^2 \beta^2}{(B^2 + C^2 \alpha^2) \beta^2 + 2R_1 R_2' \alpha \beta + (D^2 + E^2 \alpha^2) R_2'^2}} \quad (15)$$

Максимальный момент

$$M_{\text{к}} = \frac{m_1 U_{\text{ном}}^2 \delta^2}{2 V_{0 \text{ макс}} (R_1 \alpha \pm \sqrt{(B^2 + C^2 \alpha^2)(D^2 + E^2 \alpha^2)}} \quad (16)$$

Критическое абсолютное скольжение

$$\beta_{\text{к}} = \pm R_2' \sqrt{(D^2 + E^2 \alpha^2) / (B^2 + C^2 \alpha^2)} \quad (17)$$

Коэффициент полезного действия

$$\eta = 1 - \frac{P_n' (P_n' i^2 + \delta_n(\alpha) \psi^2 + a_{30} i^2 \mu)}{M \cdot V / P_n + P_n' (P_n' i^2 + \delta_n(\alpha) \psi^2 + a_{30} i^2 \mu)} \quad (18)$$

где промежуточные параметры :

$$i = I_2' / I_{2n}', \quad i_\mu = I_n / I_{\mu n}; \quad P_n' = \Delta P_n / P_{2n}' = \Delta P_n / M_n \cdot \omega_n$$

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = 1 / \sqrt{1 + \frac{((\frac{R_2'}{\beta} e \alpha + \delta) \frac{R_2'}{\beta} - (X_0 + X_2') (\frac{R_2'}{\beta} d - c \alpha))^2}{((\frac{R_2'}{\beta} d - c \alpha) \frac{R_2'}{\beta} + (X_0 + X_2') (\frac{R_2'}{\beta} e \alpha + \delta))^2}}$$

$$\rho = a_{31} + a_{32}; \quad \delta(\alpha) = a_{c1} \alpha + a_{c2} \delta \alpha^2;$$

$$a_{31} \approx (0,28 - 0,32); \quad a_{32} \approx a_{31}; \quad a_{30} \approx (0,02 \div 0,06);$$

$$a_{c1} + a_{c2} \delta \approx (0,22 \div 0,19); \quad a_{c2} \delta / a_{c1} \approx (0,12 \div 0,6)$$

3. Идентификаторы параметров и переменных

Исходные данные :

P_N - номинальная мощность двигателя, кВт;

U_N - номинальное напряжение обмотки статора, В;

F_N - номинальная частота тока обмотки статора, Гц;

V_0 - синхронная угловая скорость, р/с;

V_N - номинальная /паспортная/ угловая скорость, р/с;

R_1, X_1 - активное и индуктивное сопротивление обмотки статора, Ом;

R_2, X_2 - активное и индуктивное сопротивление ротора, приведённое к обмотке статора, Ом;

X_0 - сопротивление намагничения, Ом;

ND - КПД двигателя;

K_1 - коэффициент связи α и δ / $\delta = \alpha^{K_1}$ при $NZAK = 3$;

K_2 - конструктивная постоянная обмотки статора,

$$K_2 \approx 0,91 \div 0,96;$$

FOR - коэффициент форсирования обратной связи по скорости,

$$FOR = \Delta V \text{ раз} / \Delta V \text{ зам, при } FOR = 1 \text{ обратная связь}$$

отсутствует;

$NZAK$ - код закона регулирования U/F , см; алгоритм работы блока Г7, $NZAK = 1, 2, 3$ или 4;

FS - частота выходного напряжения преобразователя для исследуемого режима работы, Гц;

$S(i)$ – массив значений скольжения, для которых выполняется расчёт статических и энергетических характеристик,
 $i = I - I5;$

Результаты исследований :

$I1N, I21N, IMN, MPN, MN$ и VNS – расчётные значения номинальных токов, магнитного потока, момента и угловой скорости,
 $A, A, A, B, KH \cdot \lambda, D/C, MKR, VKP$ – максимальный момент и соответствующая ему критическая угловая скорость, $KH \cdot м, р/с;$

S – скольжение, отн.ед;

$BETA$ – абсолютное скольжение, отн.ед;

$V2$ – угловая скорость ротора, $р/с;$

M – момент на валу двигателя, $KH \cdot м;$

$J1$ – ток обмотки статора, $A;$

$J21$ – ток обмотки ротора, приведённый к обмотке статора, $A;$

JM – ток намагничения, $A;$

MP – магнитный поток; $Вб;$

KPD – расчётный КПД, отн.ед;

cos – $cos \varphi$, отн.ед.

4. Алгоритм исследований

Блок-схема алгоритма исследований представлена на рис. 1.

С целью облегчения восприятия результатов исследования и приближения описания программы к общепринятым моделям физических процессов в асинхронных двигателях, в блоке 1 алгоритма параметру ND , коэффициентам $K1, K2$ и переменным $MN, M, MNP, MK, I21N,$

$I1, I21, IM, I1N$ и IMN установлен вещественный тип.

В блоке 1 также обеспечивается выделение необходимого объёма памяти для массивов и осуществляется ввод исходных данных-параметров двигателя и задания режима работы.

В блоке 2 задаются начальные условия, $ALFA=1, GAMA=1; J=1; I=1$

В блоке 3 вычисляются коэффициенты рассеяния и промежуточные параметры /формулы 4, 10, 5, 7, 6, 8, 9/, вычисляются номинальное абсолютное скольжение и номинальная угловая скорость ротора при условии обеспечения номинального момента, $MN=PN/VN$

Номинальное абсолютное скольжение определяется как меньший по абсолютному значению корень уравнения II решённого относительно $BETA$ при $M=MN$

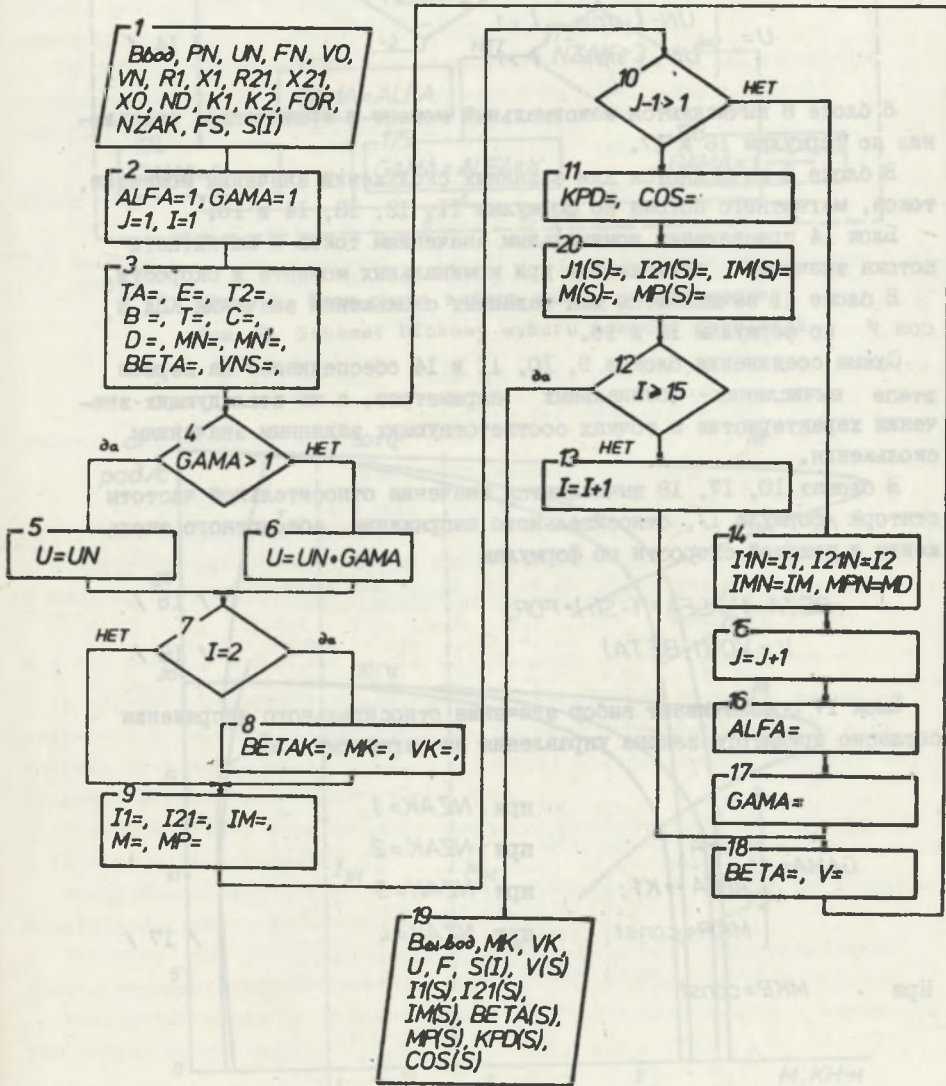


Рис. 1. Блок-схема алгоритма исследований
 Rys. 1. Schemat blokowy algorytmu obliczeń

Блоки 4, 5 и 6 ограничивают напряжение преобразователя на уровне номинального значения при увеличении частоты выше номинального значения по алгоритму

$$U = \begin{cases} UN \cdot s & \text{при } s < 1 \\ UN & \text{при } s > 1 \end{cases} \quad / 14 /$$

В блоке 8 вычисляются максимальный момент и критическое скольжение по формулам 16 и 17.

В блоке 9 вычисляются для заданных скольжений значения моментов, токов, магнитного потока по формулам 11, 12, 13, 14 и 15.

Блок 14 присваивает номинальным значениям токов и магнитного потока значения, вычисленные при номинальных моменте и скорости.

В блоке 11 вычисляются для заданных скольжений значения КЩД и $\cos \varphi$ по формулам 18 и 19.

Схема соединения блоков 9, 10, 11 и 14 обеспечивает на первом этапе вычисления номинальных параметров, а на последующих значения характеристик в точках соответствующих заданным значениям скольжения.

В блоках 10, 17, 18 вычисляются значения относительной частоты статора /формула 1/, относительного напряжения, абсолютного скольжения и угловой скорости по формулам

$$BETA = 1 - ALFA \cdot (1 - S(i)) \cdot FOR \quad / 15 /$$

$$V = VO \cdot (1 - BETA) \quad / 16 /$$

Блок 17 обеспечивает выбор значения относительного напряжения согласно принятого закона управления по алгоритму

$$GAMA = \begin{cases} 1; & \text{при } NZAK = 1 \\ ALFA, & \text{при } NZAK = 2 \\ ALFA \cdot K1; & \text{при } NZAK = 3 \\ MKR = const, & \text{при } NZAK = 4 \end{cases} \quad / 17 /$$

При $MKP = const$

$$GAMA = \sqrt{\frac{R1 + ALFA + \sqrt{(B^2 + C \cdot ALFA) \cdot 2} \cdot (D^2 + C \cdot ALFA) \cdot 2}{R1 + \sqrt{(B^2 + C) \cdot (D^2 + E^2)}}} \quad / 18 /$$

Расширенная схема блока 17 представлена на рис.2.

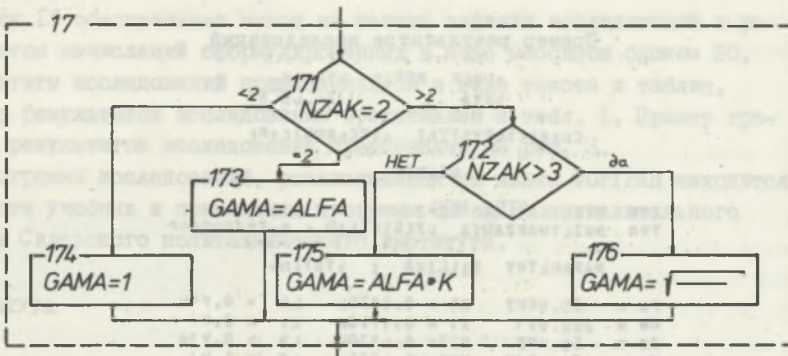


Рис. 2. Блок-схема выбора закона регулирования
 Rys. 2. Schemat blokowy wyboru sposobu regulacji

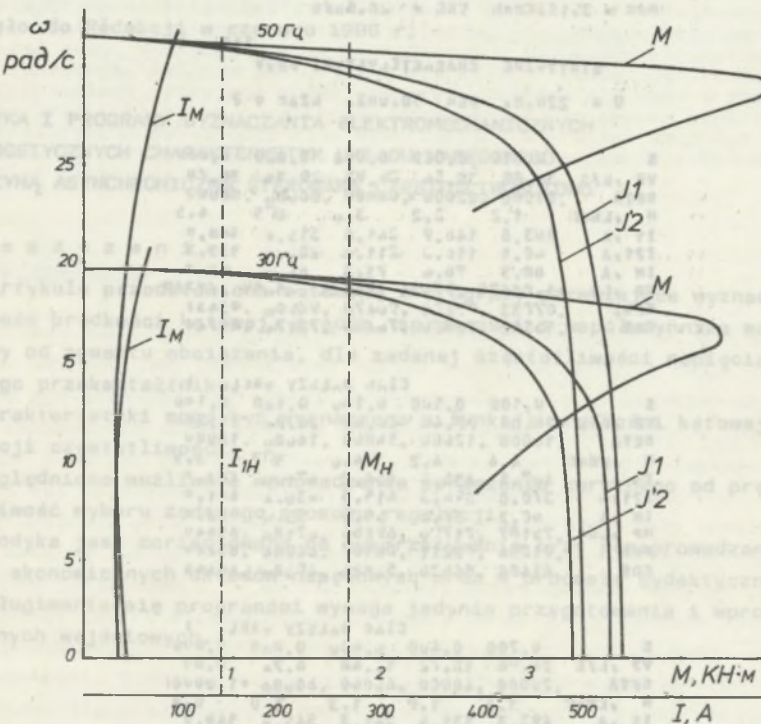


Рис. 3. Пример графиков результатов исследований
 Rys. 3. Przykład ilustracji graficznej rezultatów obliczeń

Таблица 1

Пример результатов исследований

AUTOKR BORIS RYBALKO
DATA 24.03.87

CHARAKTERYSTYKI ASYCHRONICZNE

SILNIK

TYP SILNIKA AO BC-2
TYP PRZETWARZANIA CZESTOTLIW FWT-380-400

PARAMETRY SILNIKA I SYSTEMU

PN = 55.0KVT R1 = 0.0570H LD = 0.90h
UN = 220.0V X1 = 0.1750H L1 = 2.0h
FN = 50.0HZ R21 = 0.0330H L2 = 0.95h
VN = 31.0R/S X21 = 0.2330H KPL = 1.0h
VN = 30.0R/S XU = 2.500 h2ak = 2

OBLICZONE NOMINALNE PARAMETRY

I1N = 132.0A I1L = 79.2A I1M = 1.453PN/M
I21N = 96.0A I21L = 0.4403LD VLS = 30.007R/S
KRYTYCZNE KCI.LLY I PRZEMKUR
MKR = 3.153K/MH VKR = 28.6K/S

TABL. 1

STATYCZNE CHARAKTERYSTYKI PRZY

U = 220.0, FS = 50.0HZ, hZAK = 2

S	0.010	0.020	0.040	0.080	0.100
V2 ,K/S	30.89	30.50	29.95	29.34	28.70
BETA	.01000	.02000	.04000	.06000	.08000
M ,kN/m	1.2	2.2	3.0	4.3	4.5
I1 ,A	103.8	146.9	241.6	315.1	368.9
I21 ,A	60.1	110.5	211.4	282.4	335.7
IM ,A	80.5	78.4	73.3	66.9	63.0
MP ,hB	1.00476	.97024	.91444	.85159	.79577
KPD	.97833	.97724	.96478	.94590	.93431
COS	.55562	.72720	.76406	.72171	.66722

CIAG DALSZY TABEL. 1

S	0.100	0.120	0.140	0.160	0.180
V2 ,1/S	28.08	27.40	26.63	26.21	25.50
BETA	.10000	.12000	.14000	.16000	.18000
M ,kN/m	4.4	4.2	4.0	3.7	3.5
I1 ,A	407.5	435.5	456.2	471.0	485.7
I21 ,A	370.0	350.5	419.8	430.4	441.0
IM ,A	60.3	57.5	55.5	55.0	52.0
MP ,hB	.75187	.71750	.67166	.67184	.65060
KPD	.91834	.90211	.88567	.86904	.85224
COS	.61686	.56026	.52424	.48580	.46444

CIAG DALSZY TABEL. 1

S	0.200	0.400	0.600	0.800	1.000
V2 ,1/S	24.06	18.72	12.48	6.24	0.00
BETA	.20000	.40000	.60000	.80000	1.00000
M ,kN/m	3.3	1.9	1.3	1.0	0.8
I1 ,A	493.3	531.4	541.3	545.4	548.0
I21 ,A	450.4	485.0	455.1	494.1	501.0
IM ,A	51.7	46.1	47.4	47.4	47.2
MP ,hB	.64435	.60004	.59183	.58940	.58871
KPD	.85526	.65021	.65017	.24194	.00000
COS	.43012	.30520	.25304	.22700	.21000

Блок 19 обеспечивает вывод на печать задания исследований и результатов вычислений сформулированных в виде массивов блоком 20. Результаты исследований представляются в виде текста и таблиц. Пример результатов исследований представлен в табл. 1. Пример графиков результатов исследований представлен на рис. 3.

Программа исследований, реализованная на языке ФОРТРАН находится в пакете учебных и прикладных программ ЭВМ ОДРА вычислительного центра Силезского политехнического института.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Сандлер А.С., Сарбатов Р.С.: Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями, Москва, Энергия 1974.

Recenzent: Doc. dr inż. Stanisław Nitka

Wpłynęło do Redakcji w czerwcu 1988 r.

METODYKA I PROGRAMY WYZNACZANIA ELEKTROMECHANICZNYCH I ENERGETYCZNYCH CHARAKTERYSTYK UKŁADU NAPĘDOWEGO Z MASZYNĄ ASYNCHRONICZNĄ STEROWANĄ CZĘSTOTLIWOŚCIOWO

S t r e s z c z e n i e

W artykule przedstawiono metodykę i programy pozwalające wyznaczać zależność prędkości kątowej, prądów, sprawności i współczynnika mocy maszyny od momentu obciążenia, dla zadanej częstotliwości napięcia wyjściowego przekształtnika.

Charakterystyki mogą być wyznaczone w funkcji prędkości kątowej lub w funkcji częstotliwości.

Uwzględniono możliwość wprowadzenia sprzężenia zwrotnego od prędkości i możliwość wyborużądanego sposobu regulacji.

Metodyka jest zorientowana na wykorzystywanie przy przeprowadzaniu analiz ekonomicznych układów napędowych oraz w procesie dydaktycznym.

Posługiwanie się programami wymaga jedynie przygotowania i wprowadzenia danych wejściowych.

METHODOLOGY AND PROGRAMMES OF ELECTROMECHANIC AND ENERGETIC CHARACTERISTIC DETERMINATION OF PROPELLING SYSTEM WITH ASYNCHRONOUS MACHINE CONTROLLED AT A FREQUENCY

Summary

This article has shown the methods and programmes that allow to determine the correlation between the angular velocity, the currents, the efficiency and the power factor from the loading torque for the given frequency of the voltage of the supplying converter.

These characteristics can be determined in the angular velocity function or in the frequency function.

The article does also mention the possibility of introducing the feedback in accordance with velocity and the possibility of choosing the right way of regulation.

The methodology is arranged so that it can be used while performing the economic analyses of the velocity system and also in the teaching process.

The use of these processes demands the proper preparation and introduction of the input data.