

К ВОПРОСУ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАШИНЫ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ В РЕЖИМЕ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

А.В. Аристов, Л.И. Аристова

Томский политехнический университет, г. Томск

Рассмотрены особенности определения энергетических характеристик машины двойного питания, работающей в режиме периодического движения за счет фазовой модуляции питающих напряжений. Получены аналитические выражения для расчета энергетических характеристик и дана сравнительная оценка последних для асинхронного и квазисинхронного режимов работы. Проведена оценка обобщенного коэффициента полезного действия от параметров нагрузки.

Ключевые слова: машина двойного питания, фазовая модуляция, колебательный режим работы, энергетические характеристики, обобщенный коэффициент полезного действия.

Введение

В различных отраслях народного хозяйства в качестве источников колебательного усилия или перемещения все большее применение находят электроприводы колебательного движения (ЭКД), выполненные на базе асинхронных машин (АД), работающих непосредственно в режиме вынужденных колебаний за счет различных видов модуляции питающих напряжений (токов). Такие электроприводы позволяют без дополнительных звеньев преобразования движения обеспечить непосредственно на ходу регулируемые по частоте, амплитуде и форме колебания рабочего органа привода в самом широком диапазоне требуемых нагрузок [1].

Однако, как показывают результаты их практического применения, несмотря на всю простоту технической реализации, энергетические характеристики безредукторных КЭП на основе АД значительно уступают приводам, выполненным, например, по принципу слежения за периодическим сигналом или использующие саморевверс [2–4].

Одним из возможных путей повышения энергетических показателей безредукторных электроприводов, работающих непосредственно в режиме периодического движения, является использование в них в качестве исполнительного двигателя машины двойного питания (МДП) [5]. Как показывают проведенные исследования, такие КЭП позволяют почти в два раза улучшить не только энергетические, но и динамические характеристики электропривода благодаря возможности работать МДП как в асинхронном, так и квазисинхронном режимах [6, 7].

В данной работе предлагается оценку энергетических возможностей МДП в режиме периодического движения проводить на основании анализа потребляемой и выходной мощностей. Так как в общем случае данные характеристики имеют периодический характер, то согласно рекомендациям [8],

будем их оценивать максимальными, среднеквадратичными или мгновенными величинами.

Теоретическая часть

Полная работа, совершаемая МДП в режиме периодического движения при незатухающих колебаниях и с учетом наличия в системе диссипации (жидкостного трения), описывается выражением

$$E = \int M_{эм}(t) d\chi = \int M_{эм}(t) \omega(t) dt,$$

где $M_{эм}(t)$ – колебательный электромагнитный момент, развиваемый МДП; $\omega(t) = d\chi/dt$, $\chi(t)$ – скорость и закон движения подвижного элемента двигателя.

Считая закон движения подвижного элемента привода $\chi(t)$ гармонической функцией времени $\chi(t) = \chi_m \sin(\Omega t + \alpha)$ и ограничиваясь первым приближением колебательного электромагнитного момента $M_{эм}(t)$, величину мгновенной механической мощности двигателя можно определить как

$$P_{мех}(t) = \frac{dE}{dt} = \frac{M_{эм,m} \omega_m \sin(\varphi - \alpha)}{2} \times \\ \times [1 + \cos 2(\Omega t + \alpha)] + \frac{M_{эм,m} \omega_m \cos(\varphi - \alpha)}{2} \times \\ \times \sin 2(\Omega t + \alpha), \quad (1)$$

где $M_{эм,m}$, ω_m – амплитудные значения колебательного электромагнитного момента и скорости МДП; φ , α – начальные фазы колебательного электромагнитного момента и закона движения подвижного элемента двигателя; Ω – угловая частота колебаний.

Анализируя полученное выражение (1), можно заключить, что мгновенное значение механической мощности, развиваемой МДП при работе в режиме вынужденных колебаний, содержит две составляющие: активную и реактивную. Поскольку каждая из них вносит свой весовой вклад и является необходимой, предписанной данному физическому процессу, то оценку выходной мощно-

сти КЭП в дальнейшем будем проводить по величине полной колебательной мощности

$$P_{\text{мех}} = \sqrt{P_{\text{мех,акт}}^2 + P_{\text{мех,реак}}^2} = 0,5M_{\text{эм,м}}\omega_m, \quad (2)$$

где активная и реактивная составляющие мощности определяются как

$$\begin{aligned} P_{\text{мех,акт}} &= 0,5M_{\text{эм,м}}\omega_m \sin(\varphi - \alpha); \\ P_{\text{мех,реак}} &= 0,5M_{\text{эм,м}}\omega_m \cos(\varphi - \alpha). \end{aligned} \quad (3)$$

Отметим, что полученные выражения (2), (3) являются приближенными, так как не учитывают при расчетах составляющие мощности искажения. Тем не менее, они могут быть рекомендованы на этапе предварительного расчета при оценке предельных характеристик и выборе исполнительного двигателя [9].

Более точно величина полной выходной мощности может быть определена через квадратичные значения электромагнитного усилия и колебательной скорости:

$$\begin{aligned} M_{\text{ср.кв}} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} M_{\text{эм}}(t)^2 dt}; \\ \omega_{\text{ср.кв}} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} \omega(t)^2 dt}; \\ P_{\text{мех}} &= 0,5M_{\text{ср.кв}}\omega_{\text{ср.кв}}. \end{aligned} \quad (4)$$

Следует учесть, что при расчетах по представленным интегральным выражениям (2), (4) потреблению реактивной механической мощности будет соответствовать положительное значение $P_{\text{мех,реакт}}$, а генерированию – отрицательное, что говорит о двигательном и генераторном режимах работы двигателя в течение одного периода колебания подвижного элемента.

Исходя из того, что обобщенная нагрузка ЭКД в большинстве случаев может быть представлена как

$$M_n(t) = L_{\text{мех}} \frac{d^2\chi}{dt^2} + R_{\text{мех}} \frac{d\chi}{dt} + C_{\text{мех}}^{-1}\chi,$$

где $L_{\text{мех}}$, $R_{\text{мех}}$, $C_{\text{мех}}^{-1}$ – коэффициенты инерционного, демпфирующего и позиционного усилия нагрузки. Учитывая, что развиваемый МДП электромагнитный момент содержит пусковую f_{m1} , демпфирующую f_{m2} и позиционные f_{m0} составляющие, среднее значение выходной мощности, отдаваемой в нагрузку за период колебаний T , будет определяться постоянной составляющей активной части мгновенной механической мощности как

$$\begin{aligned} P_{\text{мех,ср}} &= \frac{1}{T} \int_t^{t+T} M_{\text{эм}}(t)\omega(t)dt = \\ &= 0,5 \frac{\Omega f_{m1} \sqrt{(C_{\text{мех}}^{-1} - L_{\text{мех}}\Omega^2)^2 + R_{\text{мех}}^2\Omega^2}}{(C_{\text{мех}}^{-1} + f_{m2} - L_{\text{мех}}\Omega^2)^2 + (R_{\text{мех}} - f_{m0})^2\Omega^2} \times \\ &\times \sin(\varphi - \alpha). \end{aligned}$$

При этом средняя за период колебания T величина реактивной составляющей будет соответствовать нулю. Последнее говорит о полном перераспределении реактивной мощности в течение периода из двигателя в нагрузку и наоборот.

Анализ полученного выражения позволяет сделать вывод о том, что даже при отсутствии в электромеханической колебательной системе позиционной нагрузки ($C_{\text{мех}}^{-1} = 0$) в электроприводе с МДП может быть достигнут резонансный режим работы при условии $f_{m2} - L_{\text{мех}}\Omega^2 = 0$. В этом случае электропривод будет обладать максимальными выходными параметрами и располагать при нулевом демпфировании ($R_{\text{мех}} = 0$) максимальными значениями полной и средней механическими мощностями

$$P_{\text{мех,ср}} = \frac{f_{m1}}{2\Omega R_{\text{мех}}^2} \sqrt{(L_{\text{мех}}\Omega^2)^2 + R_{\text{мех}}^2\Omega^2}.$$

С целью дальнейшей оценки энергетических показателей качества необходимо определить мгновенные значения потребляемых исполнительным двигателем мощностей по обмоткам статора и ротора. Последние определяются как

$$P_n(t) = U_n(t)i_n(t),$$

где n – номер соответствующего фазного тока $i_n(t)$ и напряжения $U_n(t)$.

Тогда в системе фазных координат α - β мгновенные значения мощностей при фазовом способе возбуждения колебательного режима работы за счет разночастотного питания обмоток МДП можно записать как

$$\begin{aligned} P_{\alpha\alpha}(t) &= P_1[1 - \cos 2(\omega_1 t + \theta_1)] - Q_1 \sin 2(\omega_1 t + \theta_1) - T_1; \\ P_{\beta\beta}(t) &= P_2[1 - \cos 2(\omega_2 t + \theta_2)] - Q_2 \sin 2(\omega_2 t + \theta_2) - T_2; \\ P_{\alpha\beta}(t) &= \{P_3[1 - \cos 2(\omega_1 t + \theta_3)] \cos \chi + \\ &+ P'_3[1 - \cos 2(\omega_2 t + \theta_4)] \sin \chi\} - \\ &- \{Q_3 \sin 2(\omega_1 t + \theta_3) \cos \chi + Q'_3 \sin 2(\omega_2 t + \theta_4) \sin \chi\} - T_3; \\ P_{\beta\alpha}(t) &= \{P_4[1 - \cos 2(\omega_1 t + \theta_3)] \sin \chi + \\ &+ P'_4[1 - \cos 2(\omega_2 t + \theta_4)] \cos \chi\} - \\ &- \{Q_4 \sin 2(\omega_1 t + \theta_3) \sin \chi + Q'_4 \sin 2(\omega_2 t + \theta_4) \cos \chi\} - T_4, \end{aligned} \quad (5)$$

где P_n , P'_n , Q_n , Q'_n , T_n – соответственно активные, реактивные мощности и мощности искажения; ω_1 , ω_2 , θ_n – циклические частоты и фазы питающих напряжений, причем $\omega_2 = \omega_1 + \Omega$.

Заметим, что появление мощности искажения T_n в мгновенных значениях потребляемых мощностей вызвано, в первую очередь, наличием внутренней электромеханической связи между фазными обмотками двигателя, а не искажением формы тока МДП, как это имеет место в известном смысле [7], вследствие существенной нелинейности ее параметров.

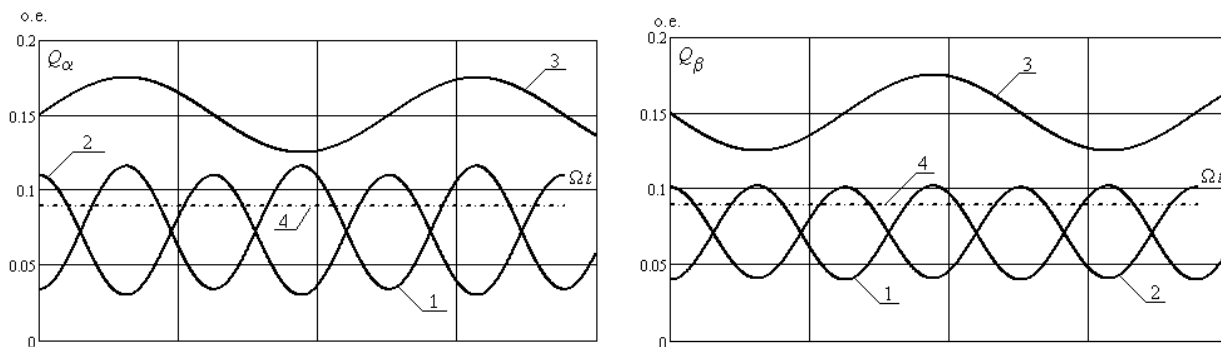


Рис. 1. Временные диаграммы активных составляющих потребляемых мощностей в режимах МДП (1 – по обмоткам статора, 2 – по обмоткам ротора, 3 – суммарные) и АД (4)

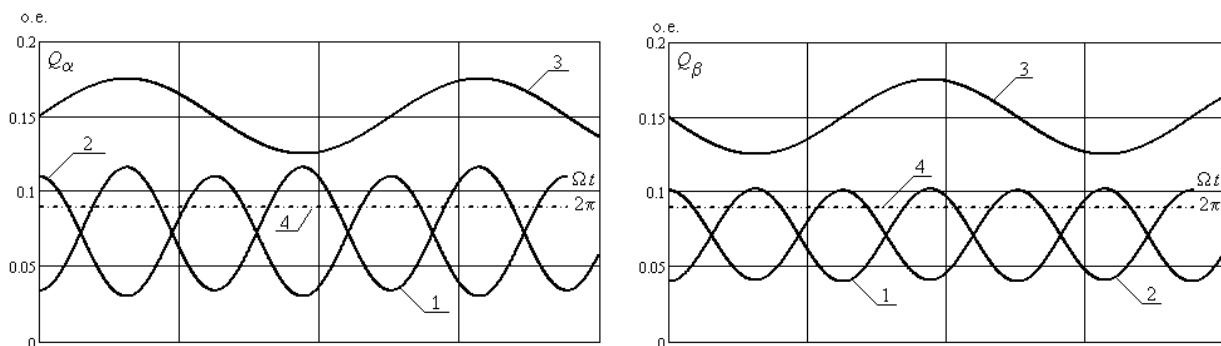


Рис. 2. Временные диаграммы составляющих реактивных потребляемых мощностей в режимах МДП (1 – по обмоткам статора, 2 – по обмоткам ротора, 3 – суммарные) и АД (4)

Если оценить значения суммарных потребляемых по осям α и β активных и реактивных мощностей:

$$P_{\alpha} = P_{\alpha s} + P_{\alpha r}; \quad Q_{\alpha} = Q_{\alpha s} + Q_{\alpha r};$$

$$P_{\beta} = P_{\beta s} + P_{\beta r}; \quad Q_{\beta} = Q_{\beta s} + Q_{\beta r},$$

то можно отметить, что потребление активных мощностей происходит только по роторным цепям, в то время как статорные обмотки МДП в режиме периодического движения рекуперировать энергию в питающую сеть. В связи с этим мощности $P_{\alpha s}$ и $P_{\beta s}$ имеют отрицательные значения. В результате при использовании в КЭП в качестве исполнительного двигателя МДП, наблюдается общее снижение потребляемой активной мощности (почти в 2 раза, по сравнению с АД) при существенном увеличении выходной мощности. Рис. 1 иллюстрирует данные выводы.

Что же касается суммарных реактивных мощностей, то в режиме МДП их значение выше из-за необходимости дополнительных затрат на формирование магнитных полей обмоток ротора (рис. 2).

Средние за период колебания значения активных и реактивных мощностей, потребляемые статорными обмотками, описываются выражениями:

$$\begin{aligned} P_{\alpha s, cp} &= \frac{1}{T} \int_t^{t+T} P_{\alpha s}(t) dt; \\ P_{\beta s, cp} &= \frac{1}{T} \int_t^{t+T} P_{\beta s}(t) dt; \\ Q_{\alpha s, cp} &= \frac{1}{T\omega_1} \int_t^{t+T} U_{\alpha s} \frac{di_{\alpha s}(t)}{dt} dt; \\ Q_{\beta s, cp} &= \frac{1}{T\omega_2} \int_t^{t+T} U_{\beta s} \frac{di_{\beta s}(t)}{dt} dt. \end{aligned} \quad (6)$$

Их мгновенные значения при фазовой модуляции питающих напряжений представлены таблице.

Из выражений (6) с учетом таблицы видно, что средние значения мощностей зависят от величины времени t . Это говорит о том, что в общем случае энергетические характеристики МДП в режиме колебательного движения являются почти периодическими функциями [10]. Поскольку кратность несущей и модулирующих частот Ω/ω_1 в общем случае является иррациональным числом, то предлагается определять их величины приближенно, либо для конкретного заданного интервала времени $\Delta t = t_1 + T$.

Полученные выражения (2)–(4), (6) являются теоретической основой для анализа и оценки энергетических возможностей МДП при работе в ре-

Составляющие активных и реактивных мощностей

$P_{as,cp}$	$P_1 - \frac{P_1 \Omega}{4\pi\omega_1} \left[\sin 2(\omega_1 t + \theta_1) (\cos 4\pi \frac{\omega_1}{\Omega} - 1) + \sin 4\pi \frac{\omega_1}{\Omega} \cos 2(\omega_1 t + \theta_1) \right] +$ $+ \frac{Q_1 \Omega}{4\pi\omega_1} \left[\cos 2(\omega_1 t + \theta_1) (\cos 4\pi \frac{\omega_1}{\Omega} - 1) - \sin 4\pi \frac{\omega_1}{\Omega} \sin 2(\omega_1 t + \theta_1) \right];$
$P_{\beta s,cp}$	$P_2 - \frac{P_2 \Omega}{4\pi\omega_2} \left[\sin 2(\omega_2 t + \theta_2) (\cos 4\pi \frac{\omega_2}{\Omega} - 1) + \sin 4\pi \frac{\omega_2}{\Omega} \cos 2(\omega_2 t + \theta_2) \right] +$ $+ \frac{Q_2 \Omega}{4\pi\omega_2} \left[\cos 2(\omega_2 t + \theta_2) (\cos 4\pi \frac{\omega_2}{\Omega} - 1) - \sin 4\pi \frac{\omega_2}{\Omega} \sin 2(\omega_2 t + \theta_2) \right];$
$Q_{as,cp}$	$Q_1 - \frac{Q_1 \Omega}{4\pi\omega_1} \left[\sin 2(\omega_1 t + \theta_1) (\cos 4\pi \frac{\omega_1}{\Omega} - 1) + \sin 4\pi \frac{\omega_1}{\Omega} \cos 2(\omega_1 t + \theta_1) \right] -$ $- \frac{P_1 \Omega}{4\pi\omega_1} \left[\cos 2(\omega_1 t + \theta_1) (\cos 4\pi \frac{\omega_1}{\Omega} - 1) - \sin 4\pi \frac{\omega_1}{\Omega} \sin 2(\omega_1 t + \theta_1) \right];$
$Q_{\beta s,cp}$	$Q_2 - \frac{Q_2 \Omega}{4\pi\omega_2} \left[\sin 2(\omega_2 t + \theta_2) (\cos 4\pi \frac{\omega_2}{\Omega} - 1) + \sin 4\pi \frac{\omega_2}{\Omega} \cos 2(\omega_2 t + \theta_2) \right] -$ $- \frac{P_2 \Omega}{4\pi\omega_2} \left[\cos 2(\omega_2 t + \theta_2) (\cos 4\pi \frac{\omega_2}{\Omega} - 1) - \sin 4\pi \frac{\omega_2}{\Omega} \sin 2(\omega_2 t + \theta_2) \right];$

жиме вынужденных колебаний, что позволяет оптимизировать электропривод по энергетическому критерию – обобщенному коэффициенту полезного действия, который без учета мощности искажения определяется как

$$\eta_E = \sqrt{\frac{P_{\text{мех,акт}}^2 + P_{\text{мех,реак}}^2}{S^2}},$$

где $S = \sqrt{P_{\text{дв}}^2 + Q_{\text{дв}}^2}$ – условно потребляемая двигателем полная мощность; $P_{\text{дв}} = \sum_{n=1}^{\infty} P_n$, $Q_{\text{дв}} = \sum_{n=1}^{\infty} Q_{n,cp}$.

Результаты проведенных исследований показали, что при изменении коэффициента нагрузки $Z_{\text{мех}}(\Omega) = (C_{\text{мех}}^{-1} - I_{\text{мех}} \Omega^2) / R_{\text{мех}} \Omega$, обобщенный коэффициент полезного действия η_E имеет свое максимальное значение при электромеханическом резонансе и определяется в основном характером изменения активной составляющей выходной мощности $P_{\text{мех,акт}}$ несмотря на то, что общая механическая мощность $P_{\text{мех}}$ имеет свое максимальное значения в до- и зарезонансных режимах работы (см. рис. 2).

Результаты расчетов показали, что обобщенный коэффициент полезного действия МДП в два раза больше чем у АД, работающего в колебательном режиме, и стремится к значению номинального КПД АД, работающего в режиме однонаправленного движения.

Заключение

1. Оценку энергетических характеристик МДП, работающей в режиме колебательного движения

за счет фазовой модуляции питающих напряжений, целесообразно проводить по интегральным выражениям приближенно, либо для конкретного заданного интервала времени.

2. Полученные выражения для энергетических характеристик позволяют не только производить анализ, но и решать задачи синтеза – создание электропривода колебательного движения, обеспечивающего при требуемых выходных параметрах максимальную выходную мощность.

3. Результаты расчетов и экспериментальных данных показали, что при прочих равных условиях режим работы МДП характеризуется более высокими энергетическими показателями благодаря обеспечению свободного энергообмена между фазами ротора, статора и источниками питания.

Литература

1. Луковников, В.И. *Электропривод колебательного движения* / В.И. Луковников. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
2. Терехов, В.М. *Оптимизация режимов слежения по потерям электроэнергии в тихоходных следящих электроприводах* / В.М. Терехов, Е.М. Овсянников, Гулям Савар // *Труды МЭИ*. – М.: Изд-во МЭИ, 1995. – Вып. 672. – С. 29–34.
3. Trombetta, P. *The electric hammer* / P. Trombetta // *J. American Inst. Electric Eng.* – 1922. – Vol. 41, no. 4. – P. 38–41.
4. Fomenko, A.N. *Resonant electric drive of dynamically counterbalanced drilling string on carrying cable with swinging movement* / A.N. Fomenko // *60 Freiburger Forschungsforum "Challenges and*

solutions in mineral industry": TU Bergakademie Freiberg. – 2009. – P. 134–138.

5. Аристов, А.В. Вопросы исследования, разработки и практического внедрения электроприводов колебательного движения с машиной двойного питания / А.В. Аристов // Вестник Уральского государственного технического университета. – 1995. – С. 234–236.

6. Аристов, А.В. О синхронном режиме машины двойного питания в колебательном движении / А.В. Аристов, В.И. Луковников // Электричество. – 1992. – № 8. – С. 31–33.

7. Шакарян, Ю.Г. Асинхронизированные синхронные машины / Ю.Г. Шакарян. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 192 с.

8. Аристов, А.В. Исследование энергетических показателей калибровочных вибростендов для РЭА / А.В. Аристов, Л.И. Аристова, Г.Г. Зиновьев // Вопросы конструирования и технологии производства РЭА. – Томск: Изд-во Томского университета. – 1986. – С. 92–95.

9. Аристов, А.В. Предельные характеристики оптико-механических систем со сканированием / А.В. Аристов, Л.И. Аристова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2015. – Т. 15, № 1. – С. 41–45.

10. Rouche, N. *Équations Différentielles Ordinaires. Tome 1. Théorie Générale. Tome 2. Stabilité et Solutions Périodiques* / N. Rouche, J. Mawhin. – Masson, Paris, 1973.

Аристов Анатолий Владимирович, д-р техн. наук, профессор кафедры «Электропривод и электрооборудование», Томский политехнический университет, г. Томск; parist@sibmail.com.

Аристова Людмила Ивановна, старший преподаватель кафедры «Электрические сети и электротехника», Томский политехнический университет, г. Томск; ali@tpu.ru.

Поступила в редакцию 29 декабря 2015 г.

DOI: 10.14529/power160105

THE PROBLEM OF DETERMINING POWER CHARACTERISTICS OF DOUBLE-FED MACHINE IN THE OSCILLATING MOTION MODE

A.V. Aristov, parist@sibmail.com,

L.I. Aristova, ali@tpu.ru

Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

The paper considers peculiarities of determination of the power characteristics of a double-fed machine operating in the oscillating motion mode due to phase modulation of supply voltages. The analytical expressions for calculation of power characteristics have been derived; their comparative estimation has been fulfilled for asynchronous and quasi-synchronous operation modes. The generalized efficiency factor has been estimated depending on the load parameters.

Keywords: double-fed machine, phase modulation, oscillating operation conditions, power characteristics, generalized efficiency factor.

References

1. Lukovnikov V.I. *Jelektroprivod kolebatel'nogo dvizhenija* [Oscillatory Electric Drive]. Moscow, Jenergoatomizdat Publ., 1984, 152 p.

2. Terekhov V.M., Ovsyannikov Ye.M., Gulyam Savar. [Optimization of Servo Modes According to Electrical Energy Losses in Low-speed Servo Drives]. *Trudy MEI* [Transactions of Moscow Power-Engineering Institute]. Moscow, MPEI Publ., 1995, vol. 672, pp. 29–34. (in Russ.)

3. Trombetta P. The Electric Hammer. *J. American Inst. Electric Eng*, 1922, vol. 41, no. 4, pp. 38–41.

4. Fomenko A.N. Resonant Electric Drive of Dynamically Counterbalanced Drilling String on Carrying Cable with Swinging Movement. *60 Freiburger Forschungsforum "Challenges and Solutions in Mineral Industry": TU Bergakademie Freiberg*, 2009, pp. 134–138.

5. Aristov A.V. [Features of Research, Design and Implementation of Electric Drives of Oscillating Motion with Double-fed Machine]. *Bulletin of the South Ural State University*, 1995, pp. 234–236. (in Russ)

6. Aristov A.V., Lukovnikov V.I. [About Synchronous Mode of Double-Fed Machine in Oscillating Mode]. *Electrical Technology Russia*, 1992, no. 8, p. 31–33. (in Russ)

7. Shakaryan Yu.G. *Asinhronizirovannye sinhronnye mashiny* [Desynchronized Synchronous Machines]. Moscow, Jenergoatomizdat Publ., 1984. 192 p.

8. Aristov A.V., Aristova L.I., Zinovyev G.G. [Study of Power Indexes of Calibrating Vibration Stands for Radio Electronic Devices]. *Voprosy konstruirovaniya i tekhnologii proizvodstva REA* [Features of Designing and Production Engineering of Radio Electronic Devices]. Tomsk, House of Tomsk University Publ, 1986, pp. 92–95.

9. Aristov A.V., Aristov L.I. [Limiting Characteristics of Optical-Mechanical Scanning Systems]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2015, vol.15, no. 1, pp. 41–46. (in Russ.)

10. Rouche N., Mawhin J. *Équations Différentielles Ordinaires. Tome 1. Théorie Générale. Tome 2. Stabilité et Solutions Périodiques*. Masson, Paris, 1973.

Received 29 December 2015

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Аристов, А.В. К вопросу об определении энергетических характеристик машины двойного питания в режиме колебательного движения / А.В. Аристов, Л.И. Аристова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2016. – Т. 16, № 1. – С. 30–35. DOI: 10.14529/power160105

FOR CITATION

Aristov A.V., Aristova L.I. The Problem of Determining Power Characteristics of Double-Fed Machine in the Oscillating Motion Mode. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2016, vol. 16, no. 1, pp. 30–35. (in Russ.) DOI: 10.14529/power160105