

А. М. АФАНАСОВ (ДНУЖТ), С. В. АРПУЛЬ (ДНУЖТ), А. Е. ДРУБЕЦКИЙ (ДНУЖТ)

Кафедра «Электроподвижной состав железных дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. акад. В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 31, эл. почта afanasof@ukr.net, arpul@ukr.net, drubetskiy.ae@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0003-4609-2361, orcid.org/0000-0001-5691-0925

СИНТЕЗ СИСТЕМ ВЗАИМНОГО НАГРУЖЕНИЯ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО И ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ТОКА

Введение

Необходимым условием решения проблемы выбора рациональной структуры системы для испытания электромашин тягового подвижного состава является наличие систематизированного перечня всех принципиально возможных вариантов создания условий взаимного нагружения и схемных решений реализации таких условий. Для решения этих задач необходим системный подход, основанный на анализе общих принципов обеспечения процесса взаимного нагружения [1].

Общий анализ энергетических процессов в системах взаимного нагружения показывает, что основными устройствами, которые определяют алгоритм функционирования системы, являются преобразователи электрической и механической мощности.

Постановка задачи

Любая система может быть охарактеризована своими закономерностями переноса энергии между формами движения и особенностями преобразования видов энергии внутри одной формы [2, 3]. В общем случае система взаимного нагружения электромашин характеризуется тремя основными формами движения: механической, электромагнитной и тепловой.

Каждой форме движения системы присущи определенные виды энергии, основные из которых: кинетическая, потенциальная и энергия диссипации. При работе системы взаимного нагружения любой структуры происходит перенос энергии между формами движения, а также преобразования видов энергии внутри одной формы движения.

Уравнение состояния любой формы движения любой системы может быть записано в виде выражения для динамического воздействия [4]

$$U_i = \frac{\partial w}{\partial q_i} \quad (1)$$

где ∂w – энергетическое воздействие;

q_i – координата состояния;

Координатой состояния механической формы движения в системе взаимного нагружения является угловое перемещение φ , а координатой состояния электромагнитной формы движения – заряд q .

Динамическим воздействием для механической формы движения в соответствии с (1) является механический момент M , а для электромагнитной формы – электродвижущая сила E .

Кинематическим воздействием для механической формы движения является первая производная углового перемещения – угловая скорость, а для электромагнитной (электрической) формы – первая производная заряда – сила тока [5-8].

Преобразователем параметров потока энергии (мощности) в механической форме движения является механический редуктор (вариатор), а в электромагнитной форме движения – конвертор напряжения (тока).

Электромеханические принципы взаимного нагружения

С электромеханической точки зрения для взаимного нагружения электромашин требуется обеспечение двух основных условий: протекания тока нагрузки в испытуемых электромашинах и вращения их роторов. Условием протекания тока является компенсация всех падений напряжения в цепи электрических преобразований системы взаимного нагружения, а условием вращения роторов испытуемых электромашин – компенсация всех моментов сопротивления вращению.

Основной контур энергетических преобразований любой системы взаимной нагрузки можно условно разбить на две цепи: электрических и механических преобразований. Универсальная схема преобразования электрической мощности представлена на рис. 1.

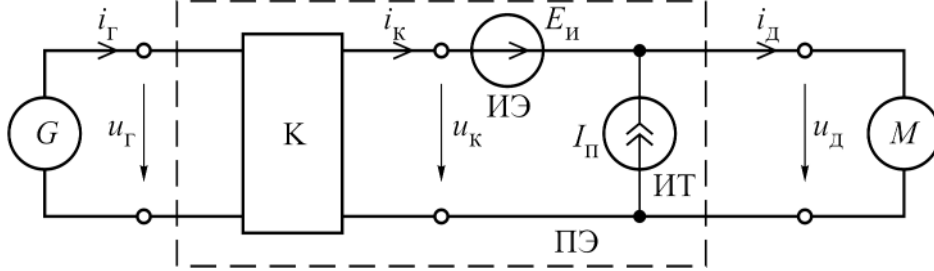


Рис. 1. Универсальная схема преобразования электрической мощности

Преобразователь электрической мощности ПЭ (обведен пунктиром) включает в себя конвертор постоянного напряжения (тока) К, источник электродвижущей силы ИЭ и источник тока ИТ. К входу преобразователя ПЭ подключен якорь генератора G , а к выходу – якорь двигателя M , при этом имеется в виду, что имеется возможность независимого регулирования магнитных потоков испытуемых машин (обмотки возбуждения на схеме не показаны). В данной схеме замещения предусмотрены все теоретически возможные виды электрических преобразований [5, 9]: конвертирование напряжения (тока); добавка электродвижущей силы (E_u), подпитка якоря двигателя током (I_u).

На приведенной схеме (рис. 1) не показаны диссипативные элементы преобразователя ПЭ, что вполне допустимо для данного анализа. Работа преобразователя будет описываться системой уравнений:

$$\begin{cases} u_\partial = u_2 \cdot K_U + E_u; \\ i_\partial = i_2 \cdot K_I + I_u, \end{cases} \quad (2)$$

где u_∂ – напряжение на входе двигателя;

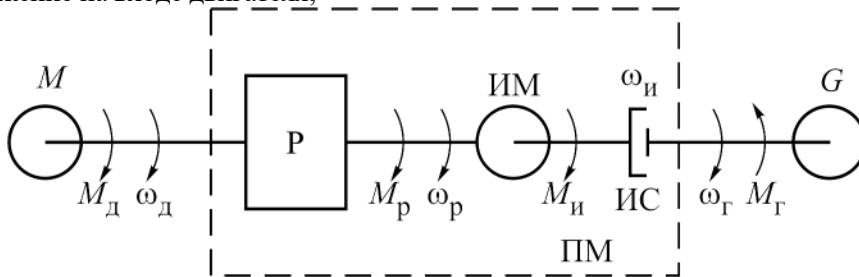


Рис. 2. Универсальная схема преобразования механической мощности

Преобразователь ПМ включает в себя механический редуктор P (вариатор), источник дополнительного момента (дополнительный двигатель) с моментом M_u и источник дополнительной угловой скорости ИС (устройство добавки угловой скорости) с добавкой ω_u . Со входом преобразователя связан вал ротора двигателя M , а с выходом – вал ротора генератора G .

В данной схеме замещения предусмотрены все теоретически возможные виды механических

u_2 – напряжение на выходе генератора;

i_∂ – ток двигателя;

i_2 – ток генератора;

K_U – коэффициент передачи напряжения;

K_I – коэффициент передачи тока.

Напряжения на зажимах двигателя и генератора:

$$u_\partial = C_\partial \cdot \Phi_\partial \cdot \omega_\partial + i_\partial \cdot R_\partial \quad (3)$$

$$u_2 = C_2 \cdot \Phi_2 \cdot \omega_2 - i_2 \cdot R_2 \quad (4)$$

где C_∂ и C_2 – конструктивные постоянные двигателя и генератора соответственно;

Φ_∂ и Φ_2 – магнитные потоки двигателя и генератора соответственно;

ω_∂ и ω_2 – угловые скорости валов двигателя и генератора соответственно;

R_∂ и R_2 – внутренние сопротивления двигателя и генератора соответственно.

Универсальная схема преобразования механической мощности представлена на рис. 2.

преобразований [7, 8]: конвертирование механического момента (угловой скорости); добавка крутящего момента дополнительным источником момента; добавка угловой скорости дополнительным источником угловой скорости.

Необходимо отметить полную аналогию процессов преобразования электрической и механической мощностей по схемам, представленным на рис. 1 и 2. На схеме замещения преобразователя механической мощности (рис. 2) так же, как и в схеме замещения электрического преобразователя

ля, не показаны диссипативные элементы. И в дальнейшем его работа будет рассматриваться без учета внутренних потерь. Работа преобразователя ПМ описывается системой уравнений:

$$M_2 = M_\partial \cdot K_M + M_u, \quad (5)$$

$$\omega_2 = \omega_\partial \cdot K_\omega + \omega_u, \quad (6)$$

где M_2 – момент на валу генератора;
 M_∂ – момент на валу двигателя;
 ω_∂ – угловая скорость вала двигателя;
 ω_2 – угловая скорость вала генератора;
 K_M – коэффициент передачи момента;
 K_ω – коэффициент передачи угловой скорости.
 Моменты на валах двигателя и генератора:

$$M_\partial = C_\partial \cdot \Phi_\partial \cdot i_\partial - \Delta M_\partial, \quad (7)$$

$$M_2 = C_2 \cdot \Phi_2 \cdot i_2 + \Delta M_2, \quad (8)$$

где ΔM_∂ и ΔM_2 – потери момента двигателя и генератора, обусловленные механическими и магнитными потерями мощности в электромашинах.

Рассмотрим условия компенсации электрических потерь в стенде взаимной нагрузки. Объединив формулы (2 - 6), после преобразований получим выражение, характеризующее баланс напряжений в электрической части схемы взаимной нагрузки в установившемся режиме

$$i_\partial R_\partial + i_2 R_2 K_U = (C_2 \Phi_2 K_U K_\omega - C_\partial \Phi_\partial) \omega_\partial + C_2 \Phi_2 \omega_u K_U + E_u \quad (9)$$

Левая часть выражения (9) представляет собой сумму падений напряжений на внутренних активных сопротивлениях электромашин, приведенную к цепи двигателя. Правая часть выражения (9) представляет собой сумму электродвижущих сил, которыми может быть скомпенсирована сумма падений напряжений. В общем виде условие протекания тока нагрузки взаимно нагруженных электромашин может быть формализовано в виде

$$(C_2 \Phi_2 K_U K_\omega - C_\partial \Phi_\partial) \omega_\partial + C_2 \Phi_2 \omega_u K_U + E_u > 0 \quad (10)$$

Рассмотрим условия компенсации потерь холостого хода в схеме взаимной нагрузки по универсальным соотношениям её основных параметров. Объединив формулы (2), (5), (7), (8), после преобразований получим уравнение, характери-

зующее баланс моментов в механической части схемы взаимной нагрузки при установившемся режиме

$$\begin{aligned} \Delta M_2 + \Delta M_\partial K_M &= \\ &= (C_\partial \Phi_\partial K_I K_M - C_2 \Phi_2) i_2 + \\ &+ E_\partial \Phi_\partial I_u K_M + M_u. \end{aligned} \quad (11)$$

Левая часть уравнения (11) представляет собой сумму потерь механических моментов на валах испытуемых электромашин, приведенную к валу генератора. Правая часть уравнения (11) представляет собой сумму моментов, которыми может быть скомпенсирована сумма потерь моментов, приведенная к валу генератора. В общем виде условие вращения роторов взаимно нагруженных электромашин может быть формализовано в виде

$$(C_\partial \Phi_\partial K_I K_M - C_2 \Phi_2) i_2 + E_\partial \Phi_\partial I_u K_M + M_u > 0 \quad (12)$$

Принципы синтеза систем взаимного нагружения

Сформулированные выше принципы взаимного нагружения тяговых электромашин позволяют систематизировать процесс синтеза принципиальных электромеханических схем взаимной нагрузки. Условие обеспечения взаимного нагружения электромашин можно выразить в виде системы [10]:

$$\begin{cases} \sum \Delta U = (C_2 \Phi_2 K_U K_\omega - C_\partial \Phi_\partial) \omega_\partial + C_2 \Phi_2 \omega_u K_U + U_u; \\ \sum \Delta M = (C_\partial \Phi_\partial K_I K_M - C_2 \Phi_2) i_2 + C_\partial \Phi_\partial I_u K_M + M_u, \end{cases} \quad (13)$$

где $\sum \Delta U$ – суммарное падение напряжений в электрических цепях схемы, приведенное к цепи якоря двигателя;

$\sum \Delta M$ – суммарные потери моментов в механической части схемы, приведенные к валу генератора.

Уравнение (13) характеризует баланс напряжений в электрической схеме стенда в стационарном режиме и определяет пять независимых условий протекания токов якорей испытуемых электромашин. Обозначим каждое из них буквой латинского алфавита от *A* до *E*. Условие *A*: $U_u > 0$. Условие *B*: $\omega_u > 0$. Условие *C*: $\Phi_2 > \Phi_\partial$. Условие *D*: $K_\omega > 1$. Условие *E*: $K_U > 1$.

Условие А является достаточным. Условие В является достаточным в случае обеспечения возбуждения испытуемого генератора G. Условия С, D и Е не являются достаточными, так как требуют наличие дополнительного источника мощности. Эти условия обеспечивают компенсацию электрических потерь только в сочетании с вращением испытуемых электромашин.

Уравнение (14) характеризует баланс моментов в механической части испытательного стенда в стационарном режиме и определяет пять независимых условий вращения валов испытуемых электромашин. По аналогии с условиями протекания токов обозначим данные условия буквами латинского алфавита от F до J. Условие F: $M_u > 0$. Условие G: $I_u > 0$. Условие H: $\Phi_\delta > \Phi_2$. Условие I: $K_M > 1$. Условие J: $K_I > 1$.

Условие F является достаточным. Условие G является достаточным в случае обеспечения возбуждения испытуемого двигателя М. Условия H, I и J не являются достаточными, так как требуют наличие дополнительного источника мощности. Компенсация потерь холостого хода обеспечивается только при сочетании любого из этих условий с протеканием токов нагрузки испытуемых электромашин.

Взаимная нагрузка двигателя М и генератора G в соответствии с системой уравнений (13), (14)

может быть обеспечена путём сочетания не менее двух условий, входящих в каждое из множеств $\{A, B, C, D, E\}$ и $\{F, G, H, I, J\}$. Условия, входящие в сочетание, не только должны быть из различных множеств, но и хотя бы одно из условий должно быть достаточным.

Техническая реализация каждого из условий A-J требует материальных затрат, поэтому наиболее рациональным с точки зрения минимума себестоимости испытательного стенда будет множество сочетаний, каждое из которых будет включать по одному условию каждого из множества $\{A, B, C, D, E\}$ и $\{F, G, H, I, J\}$. С учётом того, что хотя бы одно из условий каждого сочетания должно быть достаточным, получим искомое множество из 16 сочетаний

$$X = \{AF, AG, AH, AI, AJ, BF, BG, BH, BI, BJ, CF, CG, DF, DG, EF, EG\}$$

где $AF = A \wedge F$; $AG = A \wedge G$; $AH = A \wedge H$; $AI = A \wedge I$; $AJ = A \wedge J$; $BF = B \wedge F$; $BG = B \wedge G$; $BH = B \wedge H$; $BI = B \wedge I$; $BJ = B \wedge J$; $CF = C \wedge F$; $CG = C \wedge G$; $DF = D \wedge F$; $DG = D \wedge G$; $EF = E \wedge F$; $EG = E \wedge G$.

Характеристики управляющих параметров, входящих в уравнения (13) и (14), для каждого сочетания из множества X приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики управляющих параметров

Вариант сочетания	$U_{и}$	$\omega_{и}$	$\Phi_{Г} - \Phi_{Д}$	K_{ω}	K_U	$M_{и}$	$I_{и}$	K_M	K_I
AF	>0	0	0	1	1	>0	0	1	1
AG	>0	0	0	1	1	0	>0	1	1
AH	>0	0	<0	1	1	0	0	1	1
AI	>0	0	0	<1	1	0	0	>1	1
AJ	>0	0	0	1	<1	0	0	1	>1
BF	0	>0	0	1	1	>0	0	1	1
BG	0	>0	0	1	1	0	>0	1	1
BH	0	>0	<0	1	1	0	0	1	1
BI	0	>0	0	<1	1	0	0	>1	1
BJ	0	>0	0	1	<1	0	0	1	>1
CF	0	0	>0	1	1	>0	0	1	1
CG	0	0	>0	1	1	0	>0	1	1
DF	0	0	0	>1	1	>0	0	<1	1
DG	0	0	0	>1	1	0	>0	<1	1
EF	0	0	0	1	>1	>0	0	1	<1
EG	0	0	0	1	>1	0	>0	1	<1

Выводы

Функционирование всех систем взаимной нагрузки электрических машин постоянного тока основывается на общих электромеханических принципах взаимного нагружения и может рассматриваться как результат обеспечения двух независимых условий: протекания тока якорей и вращения валов испытуемых электромашин.

Полный ряд вариантов системы взаимного нагружения представляет собой множество схемных решений, в каждом из которых реализовано одно из возможных сочетаний условия

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Афанасов, А. М. Синтез взаимной нагрузки тяговых электромашин постоянного и пульсирующего тока // Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту: управління, економіки і технології». – Київ, 2011. – С. 6.
2. Савельев, И. В. Курс общей физики (в 5 книгах) / И. В. Савельев. – М.: АСТ: Астрель, 2005.
3. Эткин, В. А. Энергодинамика (синтез теорий переноса и преобразования энергии) / В. А. Эткин. – СПб.: Наука, 2208. – 409 с.
4. Коган, И. Ш. О возможном принципе систематизации физических величин / И. Ш. Коган // Законодательная и прикладная метрология. – 1998. – № 5. – С. 30-43.
5. Атабеков Г.И., Тимофеев А.Б., Хухриков С.С.. Теоретические основы электротехники. В 3 ч. Часть 2, Нелинейные цепи.: М. Ленинград: Госэнергоиздат. 1962. - 128 с.
6. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – М.: Гардарики, 2002. – 638 с.
7. Яблонский А. А., Никифорова В. М. Курс теоретической механики. 16-е изд. – М.: КноРус, 2011. – 608 с.
8. Тарг С. М. Краткий курс теоретической механики: Учебник для вузов. 18-е изд. – М.: Высшая школа, 2010. – 416 с.
9. Атабеков, Г. И. Основы теории цепей / Г. И. Атабеков. – М.: Энергия, 1969. – 412 с.
10. Афанасов, А. М. Электромеханические принципы обеспечения взаимной нагрузки электрических машин постоянного тока / А. М. Афанасов // Вісник Дн. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна: Зб. наук. пр. – 2009. – Вип. 27. – С. 42-46.

протекания тока якорей и условия вращения валов испытуемых электромашин.

Система взаимного нагружения тяговых электромашин может включать в себя как один, так и два источника электрической или механической мощности, в качестве источников мощности могут быть использованы: источник напряжения, источник тока, источник момента, источник угловой скорости.

Небалансная электромагнитная мощность испытуемых электромашин может создаваться за счёт разности токов их якорей, разности их магнитных потоков или разности их угловых скоростей.

REFERENCES

1. Afanasov, A.M. Sintez vzaimnoy nagruzki tyagovykh elektromashin postoyannogo i pulsiruyushogo toka [Synthesis of mutual load of traction electromachines of direct and pulsating current] Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference "Problems and Perspectives of Development of Transport Systems in the Conditions of the Reform of Railway Transport: Management, Economics And technology. " - Kyiv, 2011. - S. 6.
2. Saveliev, I.V. *Kurs obshey fiziki (v 5 knigakh)* [Course of General Physics (in 5 books)] M.: AST: Astrel, 2005.
3. Etkin, V.A. *Energodinamika* [Energodonamics (synthesis of energy transfer and transformation theories)] SPb.: Science, 2208. - 409 p.
4. Kogan, I.Sh. *O vozmjnom printsipe sistematizatsii fizicheskikh velichin* [The possible principle of the system of quantization of physical quantities] Legislative and Applied Metrology. -1998. - No. 5. - P. 30-43.
5. Atabekov G.I., Timofeev A.B., Hochrikov S.S. *Teoreticheskie osnovy elektrothniki* [Theoretical foundations of electrical engineering. At 3 h Part 2, Nonlinear Chains] M. Leningrad: State Power Publishing House. 1962. - 128 p.
6. Bessonov L. A. *Teoreticheskie osnovy elektrothniki* [Theoretical foundations of electrical engineering. Electric circuits] M.: Gardariki, 2002. - 638 p.
7. Yablonsky A.A., Nikiforova V.M. *Kurs teoreticheskoy mekhaniki* [Course of Theoretical Mechanics 16th ed.] M.: KnoRus, 2011. - 608 pp.
8. Targ S.M. *Kratkiy kurs teoticheskoy mehaiki* [Short course of theoretical mechanics: Textbook for high schools. 18th ed.] M.: Higher school, 2010. - 416 pp.
9. Atabekov, G.I. *Osnovy teorii tsepey* [Basics of the theory of chains] M.: Energiya, 1969. - 412 p.
10. Afanasov, A.M. *Elektromekhanicheskie printsipy obespecheniya vzaimnoy nagruzki elektricheskikh mashin postoyannogo toka* [Electromechanical Principles for Provision of Interconnection of Electric-Electric Direct-current Machines] *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan]. - 2009. - issue. 27. - pp. 42-46.

Поступила в печать 19.04.2017.

Внутренний рецензент Муха А. Н.

Внешний рецензент Андриенко П. Д.

© Афанасов А. М. та ін., 2017

В работе представлен принцип синтеза схем взаимной нагрузки, оптимальных с точки зрения минимума расхода электроэнергии на покрытие потерь в испытуемых машинах.

Условием обеспечения взаимного нагружения является протекание тока по обмоткам испытуемых машин и вращение их роторов. Для теоретического обоснования обеспечения этих условий были составлены универсальные схемы преобразования электрической и механической мощности. На базе этих схем были выведены аналитические зависимости условий протекания токов и баланса моментов в системе взаимного нагружения.

По полученным выражением сформулирован принцип синтеза схем взаимного нагружения и составлено множество возможных схем.

Ключевые слова: приемо-сдаточные испытания; взаимная нагрузка; тяговый электродвигатель; синтез схем взаимного нагружения.

УДК 629.423.31-048.24

А. М. АФАНАСОВ (ДНУЗТ), С. В. АРПУЛЬ (ДНУЗТ), А. Ю. ДРУБЕЦЬКИЙ (ДНУЗТ)

Каф. «Електрорухоми́й склад залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 31, ел. пошта: afanasof@ukr.net, arpul@ukr.net, drubetskiy.ae@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0003-4609-2361, orcid.org/0000-0001-5691-0925

СИНТЕЗ СИСТЕМ ВЗАЄМНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО І ПУЛЬСУЮЧОГО СТРУМУ

Застосування схеми взаємного навантаження, у якій небалансна електромагнітна потужність створюється за рахунок різниці магнітних потоків випробовуваних машин за допомогою шунтування обмотки збудження генератора, викликає розходження теплових навантажень обмоток збудження.

Ціллю роботи є дослідження розходження теплових навантажень в залежності від коефіцієнту насичення та відносної різниці магнітних потоків машин.

Врахування таких параметрів, як коефіцієнт насичення та розходження магнітних характеристик випробовуваних машин можуть бути використані для розробки автоматизованого випробувального стенду, а також дозволить підвищити якість технічного контролю при прийнятно-здавальних випробуваннях.

Ключові слова: прийнятно-здавальні випробування; взаємне навантаження; тяговий електродвигун; синтез схем взаємного навантаження.

Внутрішній рецензент *Муха А. М.*

Зовнішній рецензент *Андриєнко П. Д.*

UDC 629.423.31-048.24

A. M. AFANASOV (DNURT), S. V. ARPUL (DNURT), A. E. DRUBETSKIY (DNURT),

Department of Electric rolling stock of railways, Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, Dnepro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 31, e-mail: afanasof@ukr.net, arpul@ukr.net, drubetskiy.ae@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0003-4609-2361, orcid.org/0000-0001-5691-0925

SYNTHESIS OF SYSTEMS OF MUTUAL LOADING OF DRIVE MOTORS OF DIRECT AND PULSING CURRENT

The paper presents the principle of synthesis of mutual load schemes, optimal from the point of view of the minimum power consumption for coating losses in the machines under test.

The condition for ensuring mutual loading is the flow of current through the windings of the tested machines and the rotation of their rotors. For the theoretical substantiation of the provision of these conditions, universal circuits for converting electrical and mechanical power were compiled. On the basis of these schemes, analytical dependences of the conditions of current flow and balance of moments in the mutual loading system were derived.

According to the expression obtained, the principle of synthesis of mutual loading schemes is formulated and a number of possible schemes are compiled

Keywords: acceptance tests; mutual loading; traction motor; synthesis of mutual loading schemes.

Internal reviewer *Mukha A. M.*

External reviewer *Andrienko P. D.*