

Токопараметрическое согласование скоростей взаимосвязанных многодвигательных электромеханических систем

КАЛЮЖНЫЙ С.В.

Дается описание оригинальных силовых схем для согласования скоростей взаимосвязанных через механическое оборудование электромеханических систем постоянного и переменного тока. В основу работы положен наиболее надежный и менее инерционный принцип токопараметрического согласования за счет перераспределения токов якоря, ротора или статора с целью минимизации упругих колебательных моментов системы. Приводятся результаты моделирования в среде Matlab/Simulink.

Ключевые слова: электромеханическая система, асинхронный двигатель, токопараметрический вентильный преобразователь, параметрический источник тока

Цель статьи – проинформировать читателя об одном, по мнению автора, перспективном и малоизвестном способе согласования скоростей индивидуальных приводов постоянного либо переменного тока, работающих в составе различных многодвигательных взаимосвязанных электромеханических систем (ВСЭМС). В таких системах отдельные приводные двигатели могут быть взаимосвязаны или через общий (раздаточный) редуктор, как это делается для мощных ответственных механизмов типа шахтных подъемных машин, либо непосредственно через механическое оборудование: металлоконструкцию механизма перемещения мостового крана, общую шестерню механизма поворота роторного экскаватора, тянущую цепь (ленту) различных конвейерных установок. Скорости от-

дельных приводных двигателей указанных выше машин, а также многих других, им подобных, обязательно необходимо согласовывать для снижения упругих колебательных моментов и, следовательно, износа механического оборудования.

Широко используется способ параметрического выравнивания средней статической нагрузки при одновременном согласовании скоростей двигателей ВСЭМС, имеющих, например, два двигателя постоянного тока [1], якорные обмотки которых соединены последовательно (рис. 1) и подключены к источнику напряжения (ИН). В качестве последнего может быть электромашинный генератор или тиристорный преобразователь (ТП), внутреннее сопротивление которых сравнительно небольшое. Это определяет свободный энергообмен между электрическими машинами, а также между машинами и сетью переменного тока, если ТП обеспечивает рекуперацию энергии.

Из теории электропривода известно, что малое внутреннее сопротивление силовой цепи питания позволяет строить электроприводы как источники скорости, обладающие достаточно жесткими механическими характеристиками. В результате связи двигателей между собой валопроводами, имеющими определенный коэффициент механической жесткости (C'_{12}, C''_{12}), а также из-за наличия люфтов (Z'_0, Z''_0) в соединительных муфтах и зубчатых зацеплениях редуктора во ВСЭМС возникают упругие моменты, которые очень быстро раскачивают систему с жесткими механическими характеристиками. В кинематических цепях возникают упругие моменты, амплитуды которых в динамических режимах могут достигать опасных значений для механического оборудования, что является большим

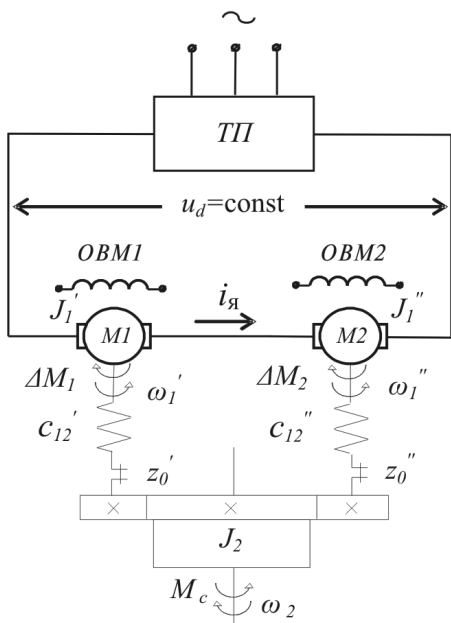


Рис. 1. Структура ВСЭМС с питанием от ИН

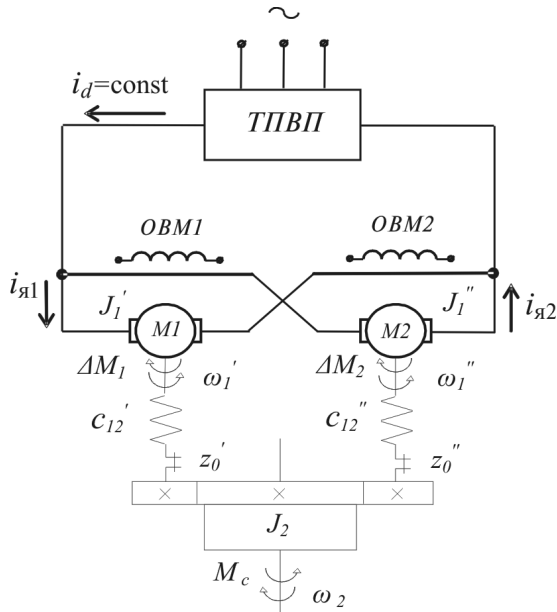


Рис. 2. Структура ВСЭМС с питанием от ИТ

недостатком традиционного способа согласования скоростей [2].

Известно, что раскачивание системы будет тем значительнее, чем большее значение имеет коэффициент электромеханической связи между двигателями. Из теории привода также известно, что ВСЭМС, которые имеют «мягкие» (так называемые «моментные») механические характеристики, обладают малыми значениями коэффициентов электромеханической связи. Такие характеристики приводов формируются наиболее просто при питании от источника тока (ИТ). Далее будут представлены разработки, выполненные в соответствии с предлагаемым способом питания многодвигательных ВСЭМС.

Способ основывается на так называемом токопараметрическом согласовании скоростей отдельных двигателей, для чего систему питают от преобразователя с «токовой» внешней характеристикой. Такой преобразователь в технической литературе [3] получил название токопараметрического вентильного преобразователя (ТПВП). Он состоит из параметрического источника тока (ПИТ), выполненного на базе LC-элементов с реверсивной тиристорно-вентильной схемой на выходе при необходимости быстрого реверсирования привода по якорю или с диодным выпрямителем на выходе при реверсировании по каналу возбуждения двигателей в случае их небольшой суммарной установленной мощности.

Принципиальная схема силовых цепей ВСЭМС с двумя двигателями показана на рис. 2 и описана в [4]. На схеме обозначены: $M1, M2$ — якорные обмотки двигателей постоянного тока; $ОВМ1, ОВМ2$

— обмотки возбуждения. В некоторых случаях для снижения массы и габаритов привода в качестве преобразователя, который стабилизирует суммарный якорный ток ($i_d = \text{const}$), может использоваться традиционный тиристорный преобразователь или широтно-импульсный регулятор с глубокой обратной связью по выходному (постоянному) току. Преобразователь для питания обмоток возбуждения двигателей на схеме рис. 2 не показан. Также не показаны тахогенератор для получения обратной связи по скорости ВСЭМС и командоконтроллер для задания уровня скорости.

На рис. 3 приведены временные диаграммы, иллюстрирующие согласование скоростей системы при скачкообразном изменении нагрузок: в момент времени $t_1 = 2$ с — второго двигателя, а в момент $t_2 = 4$ с — первого.

Для параметрического согласования скоростей ВСЭМС переменного тока может быть рекомендована однолинейная структурная схема [5], представленная на рис. 4. На схеме обозначено: $M1, M2$ — двигатели переменного тока с фазными роторами; ТПВП — нерегулируемый токопараметрический вентильный преобразователь; ПИТ — параметрический источник тока; $УМ1 \div УМ3$ — шести-пульсные диодные вентильные комплекты; $УМ4$ — тиристорный вентильный комплект, работающий в режиме инвертора ведомого сетью переменного напряжения ($\sim U$) с постоянным углом управления ($\beta = \text{const}$). Инвертор может отсутствовать в случае применения двигателей сравнительно небольшой мощности, когда для их торможения используется режим противовключения, который, кстати, более экономичен [6], чем торможение привода с питанием от ИН. Для обеспечения регулирования скорости взаимосвязанного электропривода в схему могут вводиться дополнительные узлы и блоки.

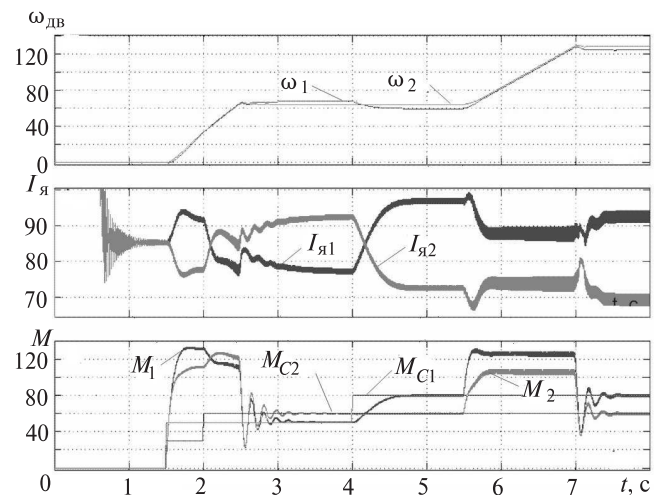


Рис. 3. Диаграммы скоростей, токов якоря, моментов двигателей и нагрузки

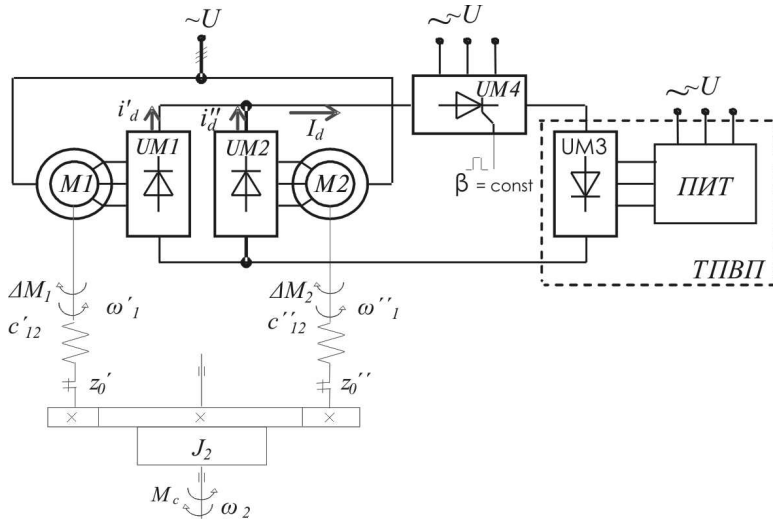


Рис. 4. Структура ВСЭМС переменного тока на базе двигателей с фазным ротором

Работу способа токопараметрического согласования скоростей для схемы переменного тока поясняют временные диаграммы, на рис. 5. В схеме асинхронные двигатели $M1$ и $M2$ работают как машины двойного питания, однако несколько необычные, так как со стороны статоров машины получают энергию от источника неизменного по действующему значению напряжения (ИН), а со стороны роторов – от источника неизменного тока (также по действующему значению), что обеспечи-

вается параметрическим ИТ. При работе диоды роторных вентильных комплектов $UM1$ и $UM2$ принудительно коммутируются линейными ЭДС фаз ротора и противоЭДС инвертора $UM4$ (или падением напряжения на резисторе R_d при протекании по нему постоянного тока I_d , если резистор включен вместо $UM4$, как указывалось выше).

Токи роторных обмоток совпадают по фазе с соответствующими фазными ЭДС, а их значение определяется выпрямленным током I_d на выходе ТПВП. Согласно первому закону Кирхгофа для узла соединения $UM1$ и $UM2$ имеем:

$$i'_d + i''_d = i_d = \text{const},$$

где два тока в левой части равенства являются входными для соответствующих роторных диодно-вентильных комплектов, работающих в принципиально новых для них режимах – инверторов, ведомых своими машинами. При указанном инверторном режиме для вентильных мостов $UM1$ и $UM2$ энергия ПИТ передается в роторные цепи двигателей пропорционально их нагрузкам.

В схеме токи в обмотках роторов двигателей не зависят от скольжения каждого ротора относительно поля статора. Электромагнитный момент двигателей определяется стабильными значениями магнитного потока статора и тока его ротора, при этом фазные токи роторов будут неизменны, а их действующее значение будет определяться статическим моментом на валу того или иного двигателя. Поэтому двигатели ровно ускоряются в динамических режимах и согласованно вращаются.

Компьютерное моделирование ВСЭМС в среде Matlab/SimPowerSystems (рис. 5) показывает, что при возникновении возмущения на первом из валопроводов ротор этого двигателя начинает пространственно отставать от второго. Это приводит к отставанию во времени ЭДС его роторной цепи, которая закрывает диоды вентильного комплекта $UM1$ позже, чем закрываются диоды $UM2$. Большая часть тока ТПВП перетекает в роторные цепи машины $M1$, уменьшая его в машине $M2$, которая при этом замедляется, а раскачивания колебаний в обоих валопроводах не возникает.

Применение описанной выше ВСЭМС на базе асинхронных двигателей с фазным ротором может дать значительный экономический эффект при большой установленной мощности двигателей, например, в случае реконструкции широко распространенных шахтных подъёмных машин с двумя двигателями, связанными с канатным барабаном

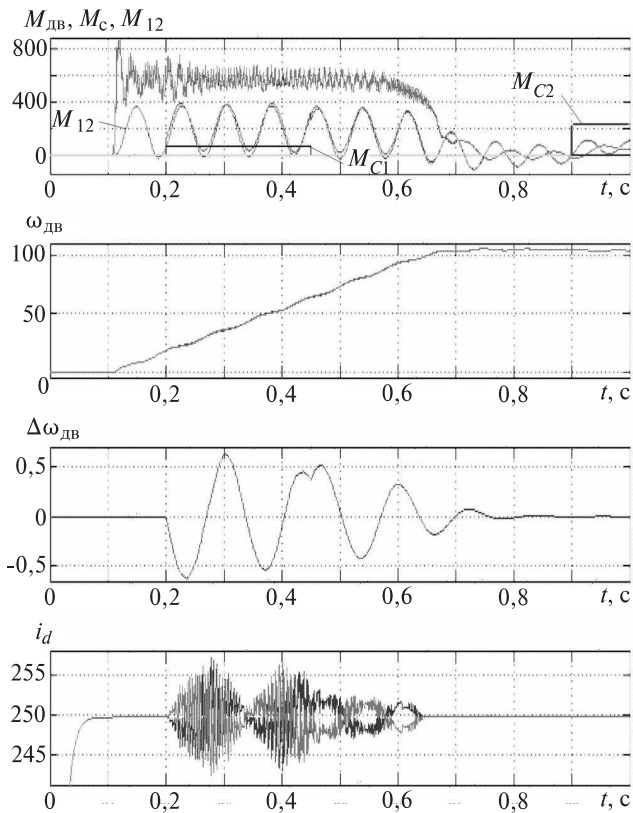


Рис. 5. Диаграммы моментов ($M_{дв}$) и скоростей ($\omega_{дв}$), упругих моментов (M_{12}), разбаланс скоростей ($\Delta\omega$), выпрямленные токи роторных вентильных комплектов (i_d)

через общий редуктор. Из-за плавности протекания переходных процессов ресурс эксплуатации каната должен повышаться, а аварийность при эксплуатации шахтного подъёма [9] снижаться.

Описанные выше структурные схемы ВСЭМС постоянного и переменного тока могут быть рекомендованы для реконструкции (без замены приводных двигателей) ранее уже сданных в эксплуатацию машин и установок. Для систем, находящихся еще в конструкторских проектах, автор рекомендует использовать двигатели переменного тока с короткозамкнутым ротором и питанием от общего токопараметрического преобразователя частоты (ТППЧ) с 12-пульсным ТПВП [7], а для приводов сравнительно небольшой мощности – с 6-пульсным преобразователем на стороне постоянного тока.

Схема компьютерной модели в среде Matlab/SimPowerSystems ВСЭМС средней мощности с двигателями типа МТКФ 411-6 (27 кВт, 380 В, 915 об/мин) на базе ТППЧ приведена на рис. 6.

Токопараметрический принцип согласования скоростей, взаимосвязанных через механическое оборудование двигателей, выполняется за счет работы в режиме источника тока автономного инвертора, построенного по классической схеме на базе тиристоров $VS1 \div VS6$ с коммутирующими конденсаторами $C1 \div C6$, отсекающими диодами $VD1 \div VD6$ и относительно небольшой индуктивностью L_d . Упругие связи и люфты в механической части схемы двухдвигательного взаимосвязанного привода моделируются подсистемой Mechanism, имеющей структуру, показанную на рис. 7. Результаты моделирования скоростей валопроводов при воздействии изменяющихся реактивных нагрузочных моментов приведены на рис. 8,а, на рис. 8,б — результаты моделирования той же ВСЭМС при работе напрямую от сети напряжения.

Выводы. 1. Способ токопараметрического согласования позволяет выравнять скорости двигателей непосредственно по силовому каналу за счет перераспределения выходного тока преобразователя

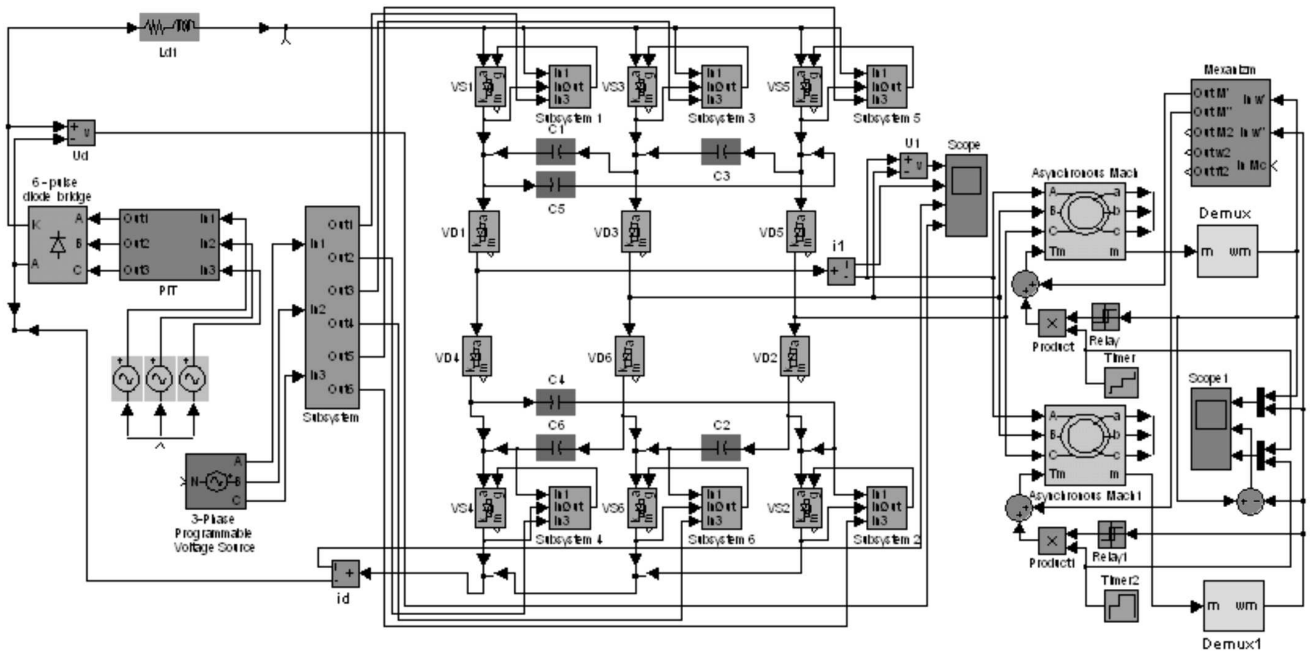


Рис. 6. Схема модели ВСЭМС переменного тока на базе ТППЧ

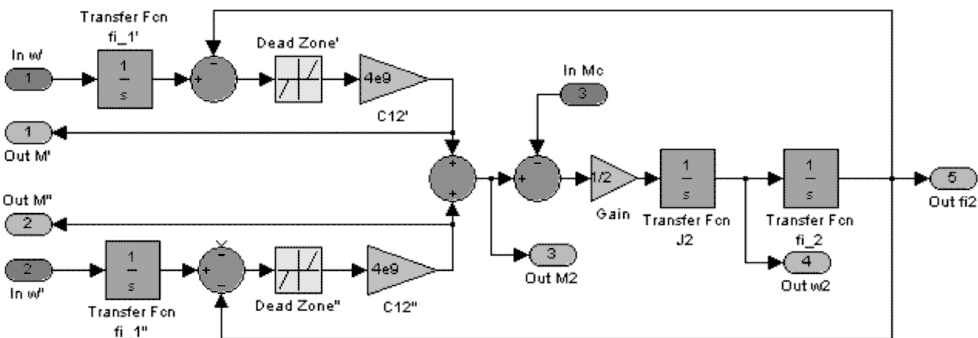


Рис. 7. Схема моделирования механической части привода с люфтами и упругими связями в каждом валопроводе

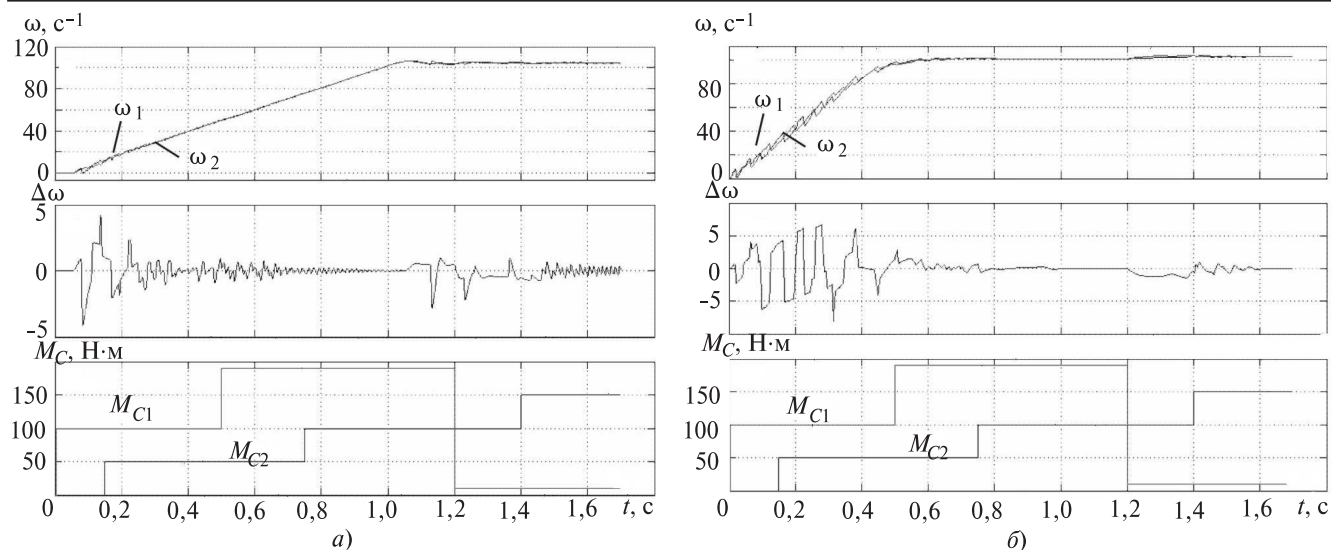


Рис. 8. Скорости валопроводов (ω_1 , ω_2), рассогласование скоростей ($\Delta\omega$), нагрузочные моменты (M_{C1} , M_{C2}) при топопараметрическом согласовании (а) и без согласования (б)

ля между якорными, роторными или статорными обмотками, поэтому имеет высокие быстродействие и надежность. Наиболее высокую надежность можно получить при питании многодвигательных систем от ТПВП, выполненного на базе ПИТ с силовыми LC-элементами, что обусловливается отсутствием обратной связи по выходному постоянному току преобразователя. При топопараметрическом согласовании взаимосвязанных через механическое оборудование многодвигательных ЭМС требуется лишь одна обратная связь по скорости какого-либо двигателя. Динамические режимы пуска и торможения двигателей протекают плавно (равноускоренно), что также положительно влияет на работу механического оборудования. Усложнять систему за счет введения каких-либо оптимизирующих регуляторов не требуется.

2. Как показывают расчеты и тензометрические измерения, способ топопараметрического согласования скоростей ВСЭМС позволяет существенно снизить нагрузки в металлоконструкциях мостового крана, которые возникают в динамических режимах работы [8]. Пятнадцатилетний срок промышленного использования описываемого способа в составе привода (рис. 4), работающего в условиях напряженного и запыленного металлургического производства, показал его высокую надежность и позволил увеличить ресурс эксплуатации механического оборудования мостового крана не менее чем в два раза.

3. В то же время автор считает, что одним из самых перспективных направлений при создании ВСЭМС средней мощности является использование разрабатываемого в настоящее время топопараметрического вентильного электропривода на базе индукторно-шаговых двигателей или обычных

синхронных двигателей, явнополюсные роторы которых могут быть выполнены в виде мощных постоянных магнитов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чиликин Г.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С. Теория автоматизированного электропривода. — М.: Энергия, 1979, 616 с.
2. Теличко Л.Я., Мещеряков В.Н., Дорофеев А.А. Анализ демпфирующей способности по критерию минимума колебательности параллельных электромеханических систем. — Известия высших учебных заведений. Электромеханика, 2006, № 5 с. 33—35.
3. Лабунцов В.А., Обухов С.Г., Чаплыгин Е.Е., Мендыбаев С.А. Топопараметрические вентильные преобразователи. — Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника, 1980, вып. 1(120), с. 3—4.
4. Калюжный С.В. Динамика взаимосвязанного электропривода согласованного вращения. — Электричество, 2012, № 3, с. 30—35.
5. Патент № 20041210488 (Україна). Регулюємий асинхронний електропривід з синхронним обертанням роторів/В.В.Калюжний, С.В.Калюжний, І.С.Шевченко. — БИ, 2008, № 15.
6. Калюжный В.В., Калюжный С.В., Садовой А.В. Особенности электромагнитных процессов в схемах преобразователей и электроприводов с питанием от источников тока. — Вестник НТУ «Харьковский политехнический институт». Серия: «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика», 2013, вып. 36(1009), с. 332—337.
7. Патент (Україна) UA 40046 А. Струмопараметричний перетворювач частоти/ В.В. Калюжний, С.В. Калюжний. — БИ, 2001, № 6.
8. Калюжный С.В., Калюжный В.В., Бондарь И.А., Луковка С.С., Роменский В.К. Снижение динамических нагрузок мостовых кранов. — Одесса: Подъемные сооружения. Специальная техника, 2013, № 11, с. 12—13.
9. Калюжный С.В., Калюжный В.В., Коваль А.Н., Чехлатый Н.А., Иваночко В.М. Двухдвигательный электропривод подъемной машины с согласованием вращения роторов и системой плавного пуска и торможения. — Проблеми експлуатації обладнання шахтних стаціонарних установок. — Донецьк : ПАТ «НДІ ГМ ім. М.М. Федорова», 2010—2011, вип. 104—105, с. 240—252.

Автор: Калужный Сергей Владимирович окончил в 1997 г. Донбасский государственный технический университет (ДонГТУ). В 2012 г. защитил кандидатскую диссертацию «Электромеханические

системы согласованного вращения с питанием от токопараметрического вентильного преобразователя. Доцент кафедры энергомеханики и оборудования ДонГТУ.

Elektrichestvo (Electricity), 2017, No. 6, pp. 59–64

DOI:10.24160/0013-5380-2017-6-59-64

Matching the Speeds of Interconnected Multimotor Electromechanical Systems

KALYUZHNYI Sergey V. (*Donbass State Technical University (DonSTU), Alchevsk, Lugansk region*) – Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

The article presents a description of original power circuits for matching the speeds of DC and AC electromechanical systems interconnected via mechanical equipment. The study is based on the principle of current-parametric matching attained due to redistribution of armature, rotor or stator currents aimed at minimizing the elastic oscillatory torques in the system. The above-mentioned principle features the highest reliability and low inertia. Results of simulation carried out in the Matlab/Simulink environment are presented.

Key words: *electromechanical system, induction motor, current-parametric valve rectifier, parametric current source*

REFERENCES

1. **Chilikin M.G., Klyuchev V.I., Sandler A.S.** *Teoriya avtomatizirovannogo elektroprivoda* (Theory of automated electric drive). Moscow, Publ. «Energiya», 1979, 616 p.
2. **Telichko L.Ya., Meshcheryakov V.N., Dorofeyev A.A.** *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika – in Russ. (News of Higher Education Institutions. Electromechanics)*, 2006, No. 5, pp. 33–35.
3. **Labuntsov V.A., Obuchov S.G., Chaplygin E.E., Mendybayev S.A.** *Elektrotekhnicheskaya promyshlennost'. Preobrazovatel'naya tekhnika – in Russ. (Electrical industry. Converter equipment)*, 1980, iss. 1(120), pp. 3–4.
4. **Kalyuzhnyi S.V.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2012, No. 3, pp. 30–35.
5. **Patent No. 20041210488 (Ukraine).** *Regulyuemii asinkhronnii elektroprivod z sinkhronnim obertannyam rotoriv/V.V. Kalyuzhnyi, S.V. Kalyuzhnyi, S.V. Shevchenko.* Bulletin of inventions, 2008, No. 15.
6. **Kalyuzhnyi V.V., Kalyuzhnyi S.V., Sadovoi A.V.** *Vestnik NTU «Khar'kovskii politekhnicheskii institute». Ser. «Problemy avtomatizirovannogo elektroprivoda. Teoriya i praktika» – in Russ. (Bulletin of National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute». Ser. «Problems of electric drive. Theory and practice»*, 2013, iss. 36(1009), pp. 332–337.
7. **Patent UA 40046 A (Ukraine).** *Strumoparametrichnii peretvoryuvach chastoti/V.V. Kalyuzhnyi, S.V. Kalyuzhnyi.* Bulletin of inventions, 2001, No. 6.
8. **Kalyuzhnyi S.V., Kalyuzhnyi V.V., Bondar' I.A., Lukovka S.S., Romenskii V.K.** *Pod'emnye sooruzheniya. Spetsial'naya tekhnika – in Russ. (Lifting facilities. Special equipment)*, 2013, No. 11, pp. 12–13 (Odessa).
9. **Kalyuzhnyi S.V., Kalyuzhnyi V.V., Koval' A.N., Chekhatyi N.A., Ivanochko V.M.** *Problemi ekspluatatsii obladnannya shakhtnikh statsionarnikh ustanovok – in Ukrainian.* Donetsk: Publichne Aktsionerne Tovaristvo «Naukovo Doslidnii Institut Girnuchoi Mekhaniki im. M.M. Fedorova». 2010–2011, vip. 104–105, pp. 240–252.

[27.03.2017]