

А. М. АФАНАСОВ (ДНУЖТ)

Кафедра «Электроподвижной состав железных дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел.: (056) 373-15-31, эл. почта: afanasof@ukr.net

АНАЛИЗ СХЕМНЫХ РЕШЕНИЙ ИСТОЧНИКОВ МОЩНОСТИ СИСТЕМ ВЗАИМНОГО НАГРУЖЕНИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОМАШИН

Введение

Требования соответствующих стандартов и правил ремонта тягового и моторвагонного подвижного состава предусматривают проведение приёмо-сдаточных испытаний каждой вновь изготовленной или вышедшей из ремонта тяговой электромашин. Эти испытания представляют собой важную и неотъемлемую часть технологического процесса изготовления или ремонта тяговой электромашин, материальные затраты на которую входят в себестоимость конечной продукции [1,2].

Высокую энергетическую эффективность испытаний при относительно невысокой суммарной мощности источников питания обеспечивают системы взаимного нагружения, в которых происходит энергообмен между испытываемыми электромашин. Источники внешнего питания в таких системах нагружения требуются для покрытия потерь мощности в испытываемых электромашин [3].

Необходимость в модернизации существующих станций для испытания тяговых электрических машин в настоящий момент является очевидной. Однако вопрос о том, какой из вариантов системы нагружения будет наиболее рациональным для определённого типа испытываемых электромашин остаётся актуальным и до настоящего времени. Одним из весомых факторов, определяющих энергетическую эффективность систем взаимного нагружения и капитальные затраты на модернизацию испытательных станций, является структура источников питания системы.

В известных вариантах схемного решения системы взаимного нагружения тяговых электромашин используются источники электрической и механической мощности: источник напряжения; источник тока; источник момента; источник угловой скорости [4]. Каждый тип источников мощности имеет ряд преимуществ и недостатков. Причем, рациональность выбора одного из типов источников будет определять-

ся, в том числе, и принятым вариантом схемы взаимного нагружения тяговых электромашин.

1 Источники электрической мощности

К источникам электрической мощности, которые рассматриваются при синтезе систем взаимного нагружения, относятся источники напряжения и источники тока. Под источником напряжения подразумевается источник электрической мощности, напряжение на выходе которого стабилизировано или изменяется в достаточно узком заданном диапазоне (не зависит от тока нагрузки). Под источником тока подразумевается источник электрической мощности, сила тока которого стабилизирована или изменяется в достаточно узком заданном диапазоне (не зависит от напряжения на нагрузке).

Схемные решения реальных источников напряжения и тока одинаковы в силовой части и отличаются, как правило, только структурой системы стабилизации. Обратная связь системы управления источником напряжения выполняется по напряжению, а источника тока – по силе тока. В одном случае используются датчики напряжения, в другом – датчики тока.

1.1 Статические источники напряжения

Опыт проектирования силовых преобразователей показывает, что структура статического источника напряжения для систем взаимного нагружения может иметь целый ряд вариантов, рациональность которых будет определяться мощностью источника, уровнем и допустимыми пульсациями напряжения на его выходе [5].

Наиболее приемлемым для питания систем взаимного нагружения будут варианты источника напряжения, структурные схемы которых представлены на рис. 1-5.

Вариант 1 (рис. 1) характерен тем, что источник напряжения ИН (объединен пунктиром) включает в себя соединенные последовательно трёхфазный трансформатор Т и управляемый трёхфазный выпрямитель УВ. Вход трансформатора Т является входом источника ИН и со-

единён с сетью С, а выход выпрямителя УВ является выходом источника ИН, к которому и подключена система взаимного нагружения СВН. Регулирование выходного напряжения U_i осуществляется управляемым выпрямителем УВ.

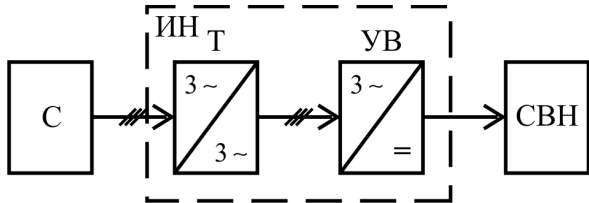


Рис. 1. Структурная схема источника напряжения с трехфазным трансформатором и управляемым выпрямителем

В варианте 2 (рис. 2) в отличие от варианта 1 отсутствует трехфазный трансформатор и управляемый трехфазный выпрямитель УВ подключен к сети С непосредственно.

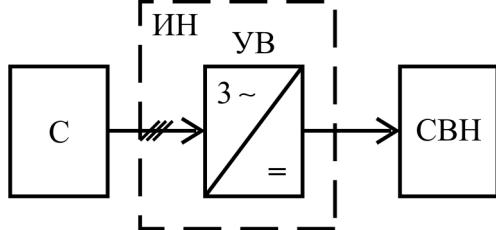


Рис. 2. Структурная схема источника напряжения с трехфазным управляемым выпрямителем

Вариант 3 (рис. 3) представляет собой структуру, содержащую последовательно соединенные трехфазный трансформатор Т, нерегулируемый трёхфазный выпрямитель НВ и импульсный регулятор ИР. Регулирование выходного напряжения U_i в данном варианте схемы осуществляется импульсным регулятором ИР.

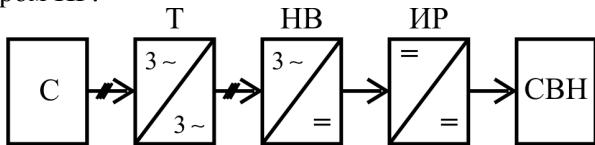


Рис. 3. Структурная схема источника напряжения с трехфазным трансформатором, выпрямителем и импульсным регулятором

В варианте 4 (рис. 4) в отличие от варианта 3 отсутствует трехфазный трансформатор, а неуправляемый трехфазный выпрямитель НВ подключен непосредственно к сети С.

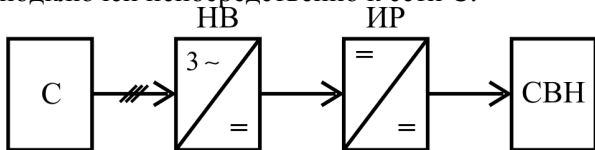


Рис. 4. Структурная схема источника напряжения с трехфазным выпрямителем и импульсным регулятором

Вариант 5 (рис. 5) представляет собой достаточно распространённую в настоящее время структуру, включающую в себя промежуточное звено переменного тока высокой частоты. Схема содержит трёхфазный выпрямитель (управляемый УВ или неуправляемый НВ), высокочастотный инвертор напряжения ИН, высокочастотный трансформатор Т и высокочастотный выпрямитель (неуправляемый НВ или управляемый УВ).

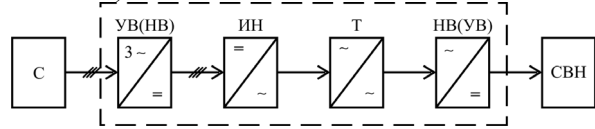


Рис. 5. Структурная схема источника напряжения с промежуточным звеном переменного тока высокой частоты

Одним из наиболее важных параметров, определяющих и структуру и характеристики статического источника напряжения ИН, является отношение выходного напряжения источника к входному напряжению сети [5]. Величина этого отношения определяет необходимость (или отсутствие таковой) использования трансформатора Т в структуре источника ИН и скважность импульсов импульсного регулятора ИР. Трёхфазный трансформатор является дополнительным преобразователем, наличие которого повышает себестоимость источника и снижает его коэффициент полезного действия.

Скважность импульсов регулятора ИР влияет на степень пульсации тока источника, определяет параметры силового ключа регулятора и его выходного фильтра, которые, в свою очередь, влияют на себестоимость всего источника напряжения ИН.

1.2 Электромашинные источники напряжения

Под электромашинными источниками напряжения будем понимать агрегированные приводной двигатель и электрический генератор [6]. В связи с тем, что базовым источником энергии является трёхфазная сеть переменного тока, в качестве приводного двигателя будем рассматривать только асинхронные электромашины промышленного назначения. Это могут быть асинхронные двигатели, как с короткозамкнутым, так и фазным ротором. В качестве генератора будем рассматривать наиболее подходящие варианты: генератор постоянного напряжения с независимым возбуждением и синхронный трёхфазный генератор с трёхфазным нерегулируемым выпрямителем. Схема

электромашинного преобразователя с генератором постоянного тока приведена на рис 6.

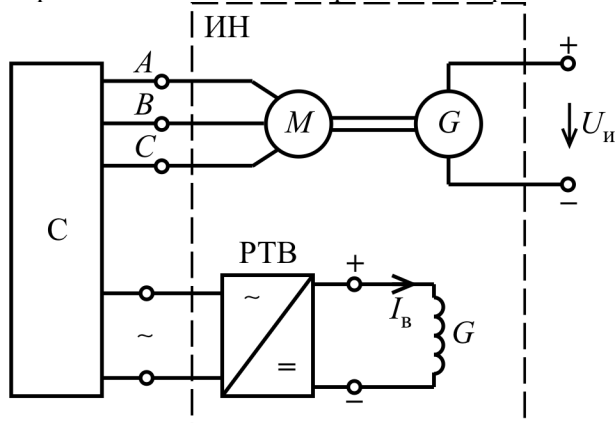


Рис. 6. Схема электромашинного преобразователя с генератором постоянного тока

Асинхронный двигатель М подключен к сети трёхфазного напряжения. его вал соединен с валом генератора постоянного напряжения G, обмотка возбуждения которого питается от регулятора тока возбуждения РТВ.

Регулятор тока возбуждения РТВ питается от сети трёхфазным либо однофазным переменным напряжением. Данное устройство, как правило, представляет собой трёхфазный либо однофазный управляемый выпрямитель.

Такая схема источника напряжения в настоящее время является наиболее распространенной в системах взаимного нагружения.

К преимуществам данной схемы компоновки источника относятся:

- относительная простота силовой части;
- высокая перегрузочная способность.

Недостатками данного варианта являются:

- повышенная зашумлённость;
- относительная сложность подбора типа генератора с соответствующими номинальными данными.

Опыт использования такой компоновки источников напряжения на испытательных станциях показывает, что последний из недостатков настолько существенный, что является определяющим при сравнении электромашинных преобразователей со статическими. Невозможность подбора генератора с требуемыми номинальными параметрами вынуждает использовать в системах взаимного нагружения в качестве источников питания электромашин, однотипные с испытуемыми. Такая ситуация, в конечном счёте, приводит к многократному завышению суммарной мощности всех вспомогательных электромашин и к существенному

снижению энергетической эффективности испытательного стенда.

Из-за использования в качестве генераторов тяговых электромашин последовательного возбуждения источники питания их обмоток возбуждения выполняются низковольтными и сильноточными.

Схема электромашинного преобразователя с синхронным генератором приведена на рис. 7. Асинхронный двигатель М, подключенный к сети С, своим валом соединен с валом синхронного генератора G, к выходу которого подключен трехфазный неуправляемый выпрямитель. Обмотка возбуждения генератора G питается от регулятора тока возбуждения РТВ, который подключен к сети С.

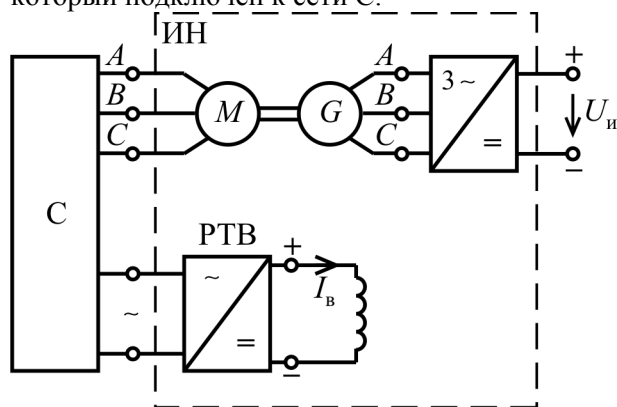


Рис. 7. Схема электромашинного преобразователя с синхронным генератором

К преимуществам такой схемы компоновки источника напряжения относятся:

- относительная простота силовой части;
- использование бесколлекторных электромашин.

Недостатками данного варианта являются: невысокая перегрузочная способность; повышенная зашумлённость;

- относительная сложность подбора типа генератора с требуемыми номинальными данными.

Общим недостатком всех вариантов электромашинных преобразователей является существенное снижение их к. п. д. при сильно заниженной нагрузке, что затрудняет унификацию испытательного стенда.

Тем не менее, при точном подборе номинальных параметров генератора электромашинные преобразователи могут быть конкурентоспособными в сравнении со статическими. Их высокая перегрузочная способность является очень существенным преимуществом в сравнении с полупроводниковыми источниками питания.

Проблема, связанная со сложностью подбора типа генератора по номинальным параметрам может быть решена путем организации производства специальных электромашин.

2 Источники механической мощности

К источникам механической мощности, рассматриваемым при синтезе систем взаимного нагружения, относятся источники момента и источники угловой скорости.

Под источником момента подразумевается источник механической мощности, момент на валу которого стабилизирован или меняется в достаточно узком заданном диапазоне (не зависит от угловой скорости вала).

Под источником угловой скорости понимается источник механической мощности, угловая скорость вала которого стабилизирована или меняется в достаточно узком заданном диапазоне (не зависит от момента на валу).

Практически источником механической мощности являются двигатели. В дальнейшем будем рассматривать только электрические двигатели, как наиболее приемлемые для использования на промышленных предприятиях [6].

То, в качестве какого источника механической мощности будет работать электрический двигатель, зависит от его механической характеристики $M = f(\omega)$, которая может быть сформулирована системой управления путём соответствующего регулирования входными параметрами.

Для получения источника момента необходимо формирование абсолютно мягкой механической характеристики ($M = \text{const}$), а для получения источника угловой скорости – абсолютно жёсткой ($\omega = \text{const}$).

Учитывая то, что источник угловой скорости (добавка угловой скорости) в соответствии со схемой компоновки системы взаимного нагружения должен иметь два вала (входной и выходной), конструктивно он будет существенно отличаться от источника момента. Рассмотрим данные источники механической мощности отдельно.

2.1 Источники механического момента

Структура источника момента, как и источника напряжения, может иметь целый ряд вариантов компоновки, рациональность которых будет определяться потребной выходной мощностью, угловой скоростью и моментом на валу.

Наиболее приемлемыми для систем взаимного нагружения будут варианты компоновки

© Афанасов А. М., 2014

источника момента, приведенные на рис. 8-10. В них используются электродвигатель постоянного тока независимого возбуждения и асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым либо фазным ротором.

Вариант 1 (рис. 8) характерен тем, что в нём использован электродвигатель независимого возбуждения М, обмотка якоря которого подключена к сети С через регулятор напряжения РН (например, управляемый трёхфазный выпрямитель), а обмотка возбуждения – через регулятор тока возбуждения РТВ. Вал якоря двигателя и есть выходом источника, к которому присоединена система взаимного нагружения СВН. Регулятор напряжения РН в данном варианте может быть заменен на неуправляемый выпрямитель. Регулирование момента при этом может осуществляться регулятором тока возбуждения РТВ.

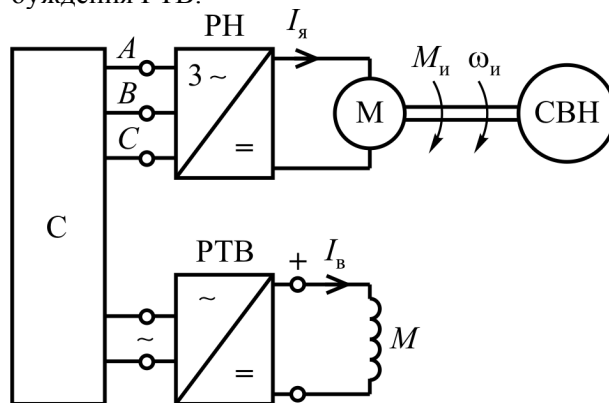


Рис. 8. Схема источника момента с двигателем постоянного тока независимого возбуждения

Вариант 2 (рис. 9) отличается тем, что в нём использован трехфазный асинхронный двигатель, который питается от сети трехфазного тока через регулятор частоты и напряжения РЧН. По существу – это частотно-управляемый асинхронный привод с соответствующим алгоритмом регулирования момента $M_и$ и изменением частоты и амплитуды фазного напряжения на выходе регулятора РЧН [6].

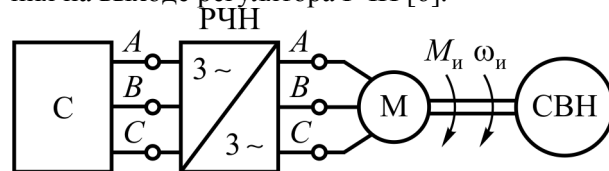


Рис. 9. Схема источника момента с частотно-управляемым асинхронным приводом

Вариант 3 (рис. 10) отличается от варианта 2 отсутствием регулятора частоты и напряжения и наличием редуктора Р, с помощью которого можно регулировать момент $M_и$ на выходе

источника. Такое регулирование может быть как ступенчатым, так и главным (при использовании вариатора).

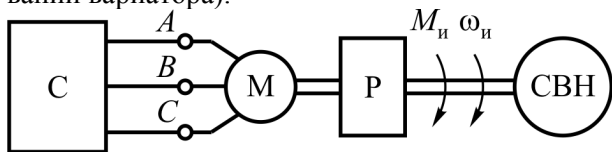


Рис. 10. Схема источника момента с асинхронным двигателем и редуктором

Преимуществом вариантов 1 и 2 является возможность широкого плавного регулирования величины момента $M_{и}$. Недостатком данных схем является наличие в источнике двух преобразователей мощности: регулятора напряжения и самого электродвигателя. И регулятор, и двигатель должен быть рассчитан на полную потребную мощность механического источника. Преобразование мощности в источнике – двойное.

Преимуществом варианта 3 является то, что асинхронный двигатель М питается от трехфазной сети непосредственно, без предварительного преобразования электрической мощности. Наличие дополнительного механического преобразователя (редуктора или вариатора) не умоляет данного преимущества, так как он намного дешевле электрического и, кроме того, может быть составляющей частью механического преобразователя момента (частоты) испытуемого двигателя в системах с таким способом создания небалансной электромагнитной мощности.

Недостатком варианта 3 является сложность широкого плавного регулирования выходного момента $M_{и}$ и, возможно, необходимость в реостатном пуске асинхронного двигателя М. Он для этого должен быть с фазным ротором.

Здесь необходимо отметить, что использование в качестве приводного двигателя асинхронной электромашин с жёсткой механической характеристикой обеспечивает приемлемую стабилизацию частоты вращения испытуемых электромашин, а при стабилизации тока нагрузки – и величины напряжения на них. При проведении испытаний на нагрев регулирования передаточного отношения редуктора Р не требуется. Проверка же коммутации в соответствии с ГОСТ 2582-81 требует наличия еще двух значений испытательной частоты вращения, а следовательно и передаточного отношения редуктора. Использование ременных вариаторов позволит решить данную проблему при

испытании вспомогательных электромашин относительно невысокой мощности.

При испытании тяговых электромашин большой мощности для получения трех фиксированных значений передаточного отношения может быть использована коробка передач.

2.2 Источники угловой скорости

Предварительно необходимо отметить, что устройства данного типа в промышленных установках практически не используются. Причиной тому является как сложность технической реализации, так и отсутствие явной потребности в устройстве. Тем не менее, существование источника угловой скорости теоретически также обосновано, как и существование источника тока [4]. Как известно, угловая скорость является механическим аналогом силы тока. Кинематическая схема, поясняющая принцип работы источника угловой скорости, приведена на рис. 11.

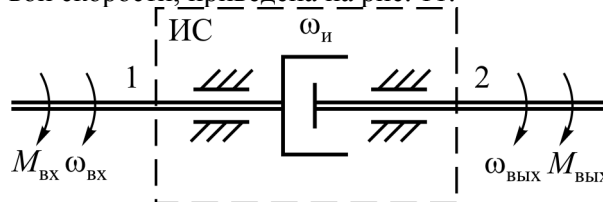


Рис. 11. Кинематическая схема источника угловой скорости

Устройство имеет два вала, один из которых условно назовём входным (вал 1), а другой (вал 2) – выходным. Отметим, что деление валов на входной и выходной также условно, как и разделение клемм электрического источника (источника тока) на положительную и отрицательную. Момент $M_{вх}$ с входного вала 1 передаётся на выходной вал 2 за счёт внутренних сил взаимодействия двух частей устройства, соединённых с валами 1 и 2. Если данное устройство электромагнитной природы, то это, по существу, могут быть силы взаимодействия вращающегося индуктора с вращающимся якорем [6]. В результате такого взаимодействия возникает разность угловых скоростей вала 1 и вала 2 (добавка скорости $\omega_{и}$).

$$\omega_{и} = \omega_{вых} - \omega_{вх}$$

где $\omega_{вых}$ и $\omega_{вх}$ – угловые скорости валов 2 и 1 соответственно.

Так как силы взаимодействия двух частей источника скорости (индуктора и якоря) являются внутренними реакциями, моменты на валах 1 и 2 равны между собой.

$$M_{\text{ВЫХ}} = M_{\text{ВХ}} = M_{\text{ИС}}$$

Любой электродвигатель со стабилизированной частотой вращения вала может рассматриваться как частный случай источника угловой скорости, входной вал которого «заземлен». Такой вариант источника скорости не может быть использован при передаче механической мощности от двигателя к генератору в системе взаимного нагружения из-за отсутствия возможности его включения между валами испытываемых электромашин.

Выходная мощность источника угловой скорости может быть представлена в виде

$$P_{\text{ИС}} = M_{\text{ИС}} \cdot \omega_{\text{И}}$$

При $\omega_{\text{И}} = 0$ устройство представляет собой электромагнитную муфту, которая не является, в отличие от источника скорости, источником мощности ($P_{\text{ИС}} = 0$).

Электромагнитная система источника скорости конструктивно может быть выполнена по принципу электромашин постоянного тока, асинхронной или синхронной электромашин.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 2582-81. Машины электрические вращающиеся тяговые. [Текст] / Государственный стандарт СССР. – М.: Издательство стандартов, 1981. – 50 с.
2. Правила ремонту электрических машин электровозов і електропоїздів. ЦТ-0063 [Текст]. – К.: Видавничий дім «САМ», 2003. – 286 с.
3. Жерве, Г. К. Промышленные испытания электрических машин / Г. К. Жерве. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 408 с.
4. Афанасов, А. М. Системы взаимного нагружения тяговых электрических машин постоянного и пульсирующего тока: монография / А. М. Афанасов. – Д.: Изд-во Маковецкий, 2012. – 248 с.
5. Бурков, А. Т. Электронная техника и преобразователи: учеб. для вузов ж.-д. трансп. / А. Т. Бурков. – М.: Транспорт, 1999. – 464 с.
6. Автоматизированный электропривод / под ред. И. Ф. Ильинского. – М.: Энергоиздат, 1990. – 544 с.

Поступила в печать 03.06.2014.

Внутренний рецензент *Гетьман Г. К.*

При выборе рационального варианта источника мощности для питания системы взаимного нагружения тяговых электромашин необходимо учитывать структуру выбранного варианта силовой схемы испытательного стенда, стоимость комплектующих агрегатов и элементов источника, а также коэффициент полезного действия источника в заданных режимах нагружения испытываемых электромашин.

Выводы

Для питания систем взаимного нагружения тяговых электромашин постоянного и пульсирующего тока могут быть использованы как статические, так и электромашинные преобразователи мощности. Рациональность использования того или иного вида преобразователя определяется типом и номинальными данными тяговой электрической машины и выбранной структурой системы взаимного нагружения электромашин. Высокая энергетическая эффективность системы взаимного нагружения может быть достигнута за счет использования источников питания с минимальным количеством преобразователей мощности.

REFERENCES

1. GOST 2582-81. *Mashiny elektricheskie vrashchayushchiesya tyagovye* [Rotating electrical machines traction] / *Gosudarstvennyy standart SSSR – State Standard of the USSR*. Moscow, Publisher standards, 1981. 50 p.
2. *Pravila remontu elektrichnikh mashin elektrovoziv i elektrovozdiv. TsT-0063* [Rules repair electric cars and electric trains. TsT-0063]. Kiev, Publishing house «SAM», 2003. 286 p.
3. Zherve G. K. *Promyshlennye ispytaniya elektricheskikh mashin* [Industrial testing of electrical machines]. Leningrad, Energoatom Publ., 1984. 408 p.
4. Afanasyov A. M. *Sistemy vzaimnogo nagruzheniya tyagovykh elektricheskikh mashin postoyannogo i pulsiruyushchego toka* [System of mutual loading traction electric machines constant and ripple current]. Dnipropetrovsk. Publishing house of Makovetsky, 2012. 248 p.
5. Burkov A. T. *Elektronnaya tekhnika i preobrazovateli* [Electronic technics and converters]. Moscow, Transport Publ., 1999. 464 p.
6. Ilinskiy I. F. *Avtomatizirovannyy elektroprivod* [Automated electric drive]. Moscow, Energoizdat, 1990. 544 p.

Внешний рецензент *Лежнюк П. Д.*

Рассмотрены вопросы выбора рациональных схемных решений источников электрической и механической мощности для питания систем взаимного нагружения тяговых электрических машин. Проведен анализ возможных вариантов технического исполнения источников напряжения и тока, источников механического момента и угловой скорости. В анализе рассмотрены как статические, так и электромашинные преобразователи электрической мощности.

Рациональность использования того или иного альтернативного варианта предложено определять по таким критериям как: максимум энергетической эффективности системы взаимного нагружения электро-

машин; минимум капітальних затрат на створення нових або модернізацію існуючих іспитальних станцій; можливість проведення всієї програми приемо-сдаточних іспитань тягових електромашин. Показано, що раціональність вибраного варіанта визначається номінальними даними іспитуваних тягових електромашин і прийнятою схемою їх взаємного навантаження. Обоснована можливість вибору в якості раціонального варіанта джерел електричної потужності електромашинних преобразователів.

Результати аналізу можуть бути використані при проектуванні станцій для проведення приемо-сдаточних іспитань електричних машин тягового і моторвагонного подвижного складу магістрального і промислового транспорту.

Ключевые слова: тяговые электромашини, испытание, взаимное нагружение, источник мощности, преобразователь, выпрямитель, инвертор.

УДК 629.423.31-048.24

А. М. АФАНАСОВ (ДНУЗТ)

Кафедра «Електрорухомий склад залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел.: (056) 373-15-31, ел. пошта: afanasof@ukr.net

АНАЛІЗ СХЕМНИХ РІШЕНЬ ДЖЕРЕЛ ПОТУЖНОСТІ СИСТЕМ ВЗАЄМНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОМАШИН

Розглянуті питання вибору раціональних схемних рішень джерел електричних та механічної потужності для живлення систем взаємного навантаження тягових електричних машин. Проведено аналіз можливих варіантів технічного виконання джерел напруги і струму, джерел механічного моменту та кутової швидкості. В аналізі розглянуті як статичні, так й електромашинні перетворювачі електричної потужності.

Раціональність використання того чи іншого альтернативного варіанту запропоновано визначати за такими критеріями як: максимум енергетичної ефективності системи взаємного навантаження електромашин; мінімум капітальних витрат на створення нових чи модернізацію існуючих випробувальних станцій; можливість проведення всієї програми приймально-здавальних випробувань тягових електромашин. Показано, що раціональність обираемого варіанту визначається номінальними даними випробовуваних тягових електромашин та прийнятою схемою їх взаємного навантаження. Обґрунтовано можливість вибору в якості раціонального варіанту джерел електричної потужності електромашинних перетворювачів.

Результати аналізу можуть бути використані при проектуванні станцій для проведення приймально-здавальних випробувань електричних машин тягового і моторвагонного рухомого складу магістрального та промислового транспорту.

Ключові слова: тягові електромашини, випробування, взаємне навантаження, джерело потужності, перетворювач, випрямляч, інвертор.

Внутрішній рецензент *Гетьман Г. К.*

Зовнішній рецензент *Лежнюк П. Д.*

UDC 629.423.31-048.24

A. M. AFANASOV (DNURT)

Department of electrorolling stock of railways. Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician Lazaryana, str. Lazaryana, 2, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010 tel.: (056) 373-15-31, e-mail: afanasof@ukr.net

ANALYSIS OF SCHEMATICS POWER SOURCES OF MUTUAL TRACTION LOAD ELECTROMACHINES

The problems of rational choice schematics sources of electrical and mechanical power supply systems for the mutual loading traction electric machines. The analysis of possible sources of technical performance voltage and current sources of mechanical torque and angular velocity. The analysis considered both static and rotating converters of electric power.

Rational use of alternative is proposed to determine the criteria such as: maximum energy efficiency of electric system load mutual; minimum capital expenditures for new or upgrading existing test stations; possibility of carrying out the program of acceptance testing of electric traction. Shown that rationality option that is selected is determined by the nominal values of traction electric cars that are tested and accepted scheme of their mutual loading. The possibility to select as a rational option sources of electric power rotating converters.

The analysis can be used in the design of stations for receiving and acceptance testing of electrical machines traction and multiple units of the main industrial and transport.

Keywords: traction electric machine, testing, mutual loading, power source, transformer, rectifier, inverter.

Internal reviewer *Getman G. K.*

External reviewer *Lezhnyuk P. D.*

© Афанасов А. М., 2014