

Янченко А. В., Чураков А. Е.
A. V. Yanchenko, A. E. Churakov

**АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УНИПОЛЯРНОГО ГЕНЕРАТОРА С КАТЯЩИМСЯ
ТОКОСЪЁМОМ В КАЧЕСТВЕ ИСТОЧНИКА ИМПУЛЬСНОГО ТОКА
ДЛЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ**

**ANALYSIS OF USE OF A UNIPOLAR GENERATOR WITH A ROLLING CURRENT
AS A SOURCE OF PULSED CURRENT FOR CONTACT WELDING**

Чураков Александр Евгеньевич – студент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(924)410-80-15. E-mail: sc15112000@gmail.com.

Alexander E. Churakov – Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(924)410-80-15. E-mail: sc15112000@gmail.com.

Янченко Андрей Вячеславович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(914)187-39-86. E-mail: ayanchenko@mail.ru.

Andrei V. Yanchenko – PhD in Engineering, Associate Professor, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(914)187-39-86. E-mail: ayanchenko@mail.ru.

Аннотация. В статье рассматривается применение униполярного генератора в качестве источника импульсного тока для контактной сварки. При этом учитываются особенности контактной сварки при использовании накопителей энергии, в качестве которых выступают конденсаторные машины (ёмкостные накопители) и униполярные машины (инерционные накопители). Показаны особенности и преимущества униполярных машин с катящимся токосъёмом. Приводится сравнение параметров контактной сварки конденсаторных машин с параметрами источника питания на базе униполярных генераторов.

Summary. The article considers the use of a unipolar generator as a source of pulsed current for contact welding. It takes into account the peculiarities of contact welding when using energy accumulators, which are capacitor machines (capacitive accumulators) and unipolar machines (inertial accumulators). The features and advantages of unipolar machines with rolling current collectors are shown. A comparison of the contact welding parameters of capacitor machines with the parameters of a power supply based on unipolar generators is given.

Ключевые слова: контактная сварка, источник питания, накопитель энергии, конденсаторная машина, параметры контактной сварки, униполярный генератор, катящийся токосъём.

Key words: contact welding, power source, energy accumulator, capacitor machine, contact-welding parameters, unipolar generator, rolling current collector.

УДК 621.791

Введение. К современным электротехнологическим установкам предъявляют повышенные требования по надёжности и технологичности. Сюда относятся массогабаритные показатели, энергоёмкость, срок службы и ряд других показателей. В состав электротехнологических установок часто входят различные преобразователи и накопители энергии. Одна из таких широко востребованных установок – машина электроконтактной сварки. Электроконтактная сварка позволяет получать листовые и другие неразъёмные соединения из магнитных и немагнитных металлов и сплавов. Такая сварка является более производительной, экологичной и экономичной по сравнению с дуговой. Среди многочисленных способов сварки доля контактной сварки в общем объёме соединений составляет порядка 30...40 % [1; 2; 5–8]. Контактная сварка обладает широкой областью применения – от полупроводниковых приборов и плёночных микросхем до крупных деталей и строительных конструкций. Установки электроконтактной сварки по принципу энергопитания

подразделяются на два вида: установки, получающие энергию в процессе работы прямо из электросети [1; 7; 9; 12] (например, сварочные трансформаторы), и установки, использующие для процесса сварки предварительно накопленную энергию. Сюда относятся широко используемые для сварки тонколистовых конструкций конденсаторные машины (КМ), параметры которых представлены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики конденсаторных машин

| Тип КМ | $P_{кз}$, кВА | Сварочный ток, кА | Толщина соединяемых деталей, мм | Масса КМ, кг | Удельная масса КМ $M_{ксм}^*$, кг/кА |
|----------|-------------------|----------------------|---------------------------------------|-----------------|--|
| МТ2103Л | 200 | 19 | 20 | 1300 | 68 |
| МТ192Л | 80 | 9 | 11 | 450 | 50 |
| МТВ6031Л | 457 | 22 | 25 | 2500 | 114 |
| МТ3001 | 140 | 16 | 18 | 1100 | 68 |
| МКТ1601 | 128 | 12 | 0,05...0,8 | 400 | 33 |

Особенности конденсаторных машин. Работа конденсаторных машин основана на разряде конденсаторов через участок контактной сварки, сжатый электродами. Разряд конденсаторов проходит за очень короткий промежуток времени. Время разряда варьируется от 0,01 до 0,1 с. Таким образом, конденсаторные машины осуществляют сварку только в «жестких» режимах, которые характеризуются более коротким импульсом тока при более высокой плотности тока (свыше 160 А/мм²). Это особенно характерно для листовых соединений лёгких сплавов [13]. Невозможность работы КМ в «мягких» режимах ограничивает применение таких машин для некоторых сплавов цветных металлов при определённой толщине соединяемых деталей (например, затруднена сварка на существующих КМ сплавов типа АМг6 толщиной 2,0 мм). Это характерно для деталей из лёгких сплавов, у которых толщина при сварке посредством современных КМ не превышает 3,0 мм. При большей толщине деталей значительно увеличивается длительность импульсов тока, что приводит к резкому увеличению габаритов и массы конденсаторов, сопутствующего оборудования и стоимости КМ в целом.

Ещё один недостаток КМ – ограниченная возможность управления сварочным током в процессе сварки. Технология контактной сварки требует корректировки формы импульса тока при определённом сочетании толщин и материалов соединяемых деталей. В КМ часто трудно получить оптимальную форму импульса, технологически требуемую при сварке некоторых деталей. Попытки преодолеть этот недостаток КМ есть (например, с помощью сочетания разрядов тока от нескольких батарей конденсаторов), но они дают положительные результаты лишь в некоторых случаях. Необходимость работы от достаточно мощной сети переменного тока является недостатком сварочных трансформаторов [16]. Для КМ следует отметить ограниченный ресурс работы конденсаторов и их высокую стоимость. Так, электролитические конденсаторы большой ёмкости имеют ресурс, определяемый их конструктивными особенностями, от 2 до 5 тыс. часов работы. При этом такие конденсаторы небезопасны и могут взрываться. Сварочные конденсаторные машины имеют средний срок службы 5 – 6 лет, а гарантийный срок эксплуатации после ремонта – не более 1 года.

Особенности униполярных машин. Одним из источников для контактной сварки может быть электромеханический преобразователь энергии на базе униполярной машины (УМ), которая имеет хорошую электромагнитную совместимость с машинами контактной сварки: большие значения токов (десятки и сотни килоампер) и низкие напряжения. При этом УМ эффективно работает на высоких частотах вращения, выступая как кинетический накопитель энергии, потребляя из сети сравнительно небольшую мощность приводного двигателя. Из табл. 2 видно, что в роли

накопителя энергии КМ существенно уступает по удельной энергоёмкости кинетическому накопителю в виде инерционного маховика [2].

Таблица 2

Сравнение накопителей энергии

| Тип накопителя энергии | Удельная энергоёмкость, Вт·ч/кг | Объёмная удельная энергоёмкость, Вт·ч/дм ³ |
|------------------------|---------------------------------|---|
| Конденсаторный | 0,072 | 0,087 |
| Инерционный маховик | 2,780 | 75...80 |

Структурная схема источника питания на базе УМ представлена на рис. 1.

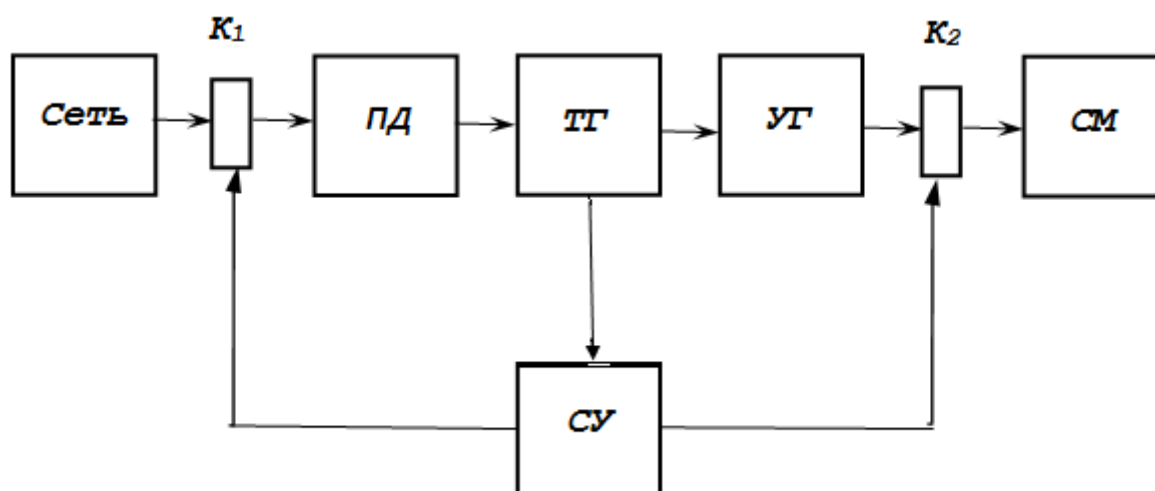


Рис. 1. Структурная схема источника тока для машины контактной сварки: ПД – приводной двигатель; ТГ – тахогенератор; УГ – униполярный генератор; К₁, К₂ – контакторы; СМ – сварочная машина; СУ – система управления

Следует отметить ряд преимуществ униполярных машин по сравнению с обычными машинами постоянного тока. В УМ принципиально возможен более высокий КПД из-за отсутствия потерь в стали на вихревые токи и гистерезис. Для УМ характерны простота конструкции, более высокое использование активных материалов, температурная стойкость и долговечность. Однако у УМ есть ряд проблем, связанных с их принципом действия и конструкцией: низкие напряжения якорных обмоток и принципиальное наличие скользящего электрического контакта. При большом количестве щёток на контактных кольцах, что обусловлено большими токами УМ, щёточный токосъём становится ненадёжным и громоздким узлом. При этом значительно возрастают механические потери на трение и снижается КПД машины. Обычные металлографитные электрощётки обладают относительно низким электрическим сопротивлением (5...7 мОм), но приводят к существенным механическим потерям за счёт трения [3]. До последнего времени значения суммарных потерь в щёточном токосъёме не позволяли создать достаточно эффективную УМ.

КПД УМ с токосъёмом на базе волоконных металлических щёток выше, чем у машин с металлографитными щётками, и доходит до 86 % [17]. Но волоконные щётки имеют очень высокую цену и сложность производства.

Токосъём на основе жидкого металла обладает наименьшим электрическим сопротивлением, но требует создания сложной и дорогой подсистемы, обеспечивающей его герметичность, безопасность и приемлемый срок службы [8–11].

Эти недостатки можно преодолеть при использовании катящегося токосъёма. Экспериментальные исследования [12; 14] показали, что у машин с катящимся токосъёмом существенно снижаются потери на трение, а КПД достигает 94 % и выше. Наиболее технологичными признаны конструкции катящегося токосъёма с разрезанной внешней обоймой (см. рис. 3, а) и с роликовыми сателлитами (см. рис. 3, б).

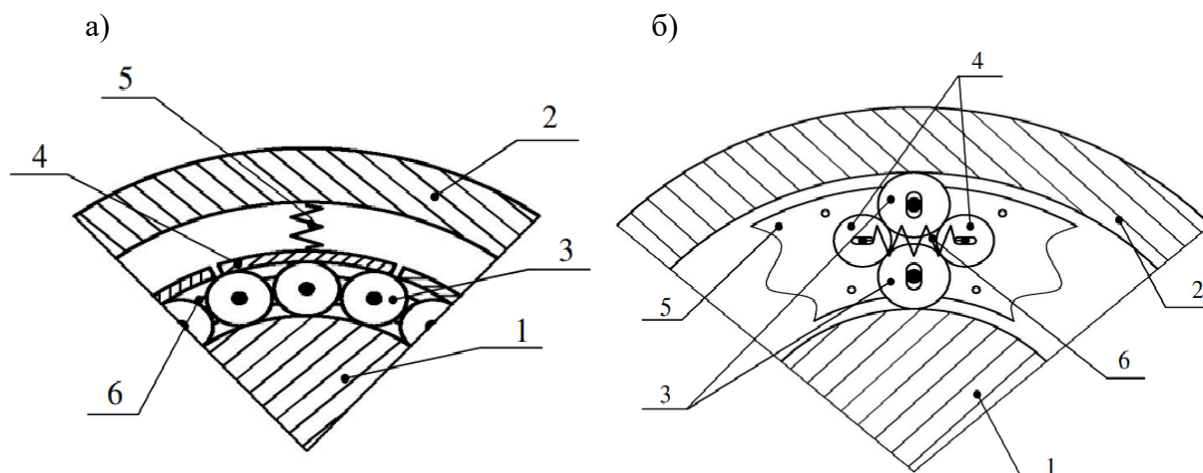


Рис. 2. Схема катящегося токосъёма: а – с разрезанной обоймой:
 1 – вал; 2 – корпус; 3 – ролики; 4 – внешняя обойма из сегментов;
 5 – поджимающая пружина; 6 – сепаратор;
 б – с парными роликовыми сателлитами:
 1 – вал; 2 – внешний корпус; 3 – ролики; 4 – две пары роликов-сателлитов;
 5 – сепаратор; 6 – стягивающая пружина

В работе [8] доказано, что конструкция токосъёма с катящимися медными роликами имеет минимальное контактное сопротивление (в диапазоне 0,18...0,21 мОм) по сравнению с другими материалами.

Результаты. Для оценки габаритов, массы и энергетических параметров был произведён численный расчёт двух однотипных двухполюсных униполярных генераторов (УГ) мощностью 145 и 200 кВт цилиндрической конструкции с компенсационной обмоткой [4; 15] (см. рис. 2).

Каждый УГ был просчитан по методике, изложенной в [12]. Для определения электрических величин УГ рассчитывалась система уравнений:

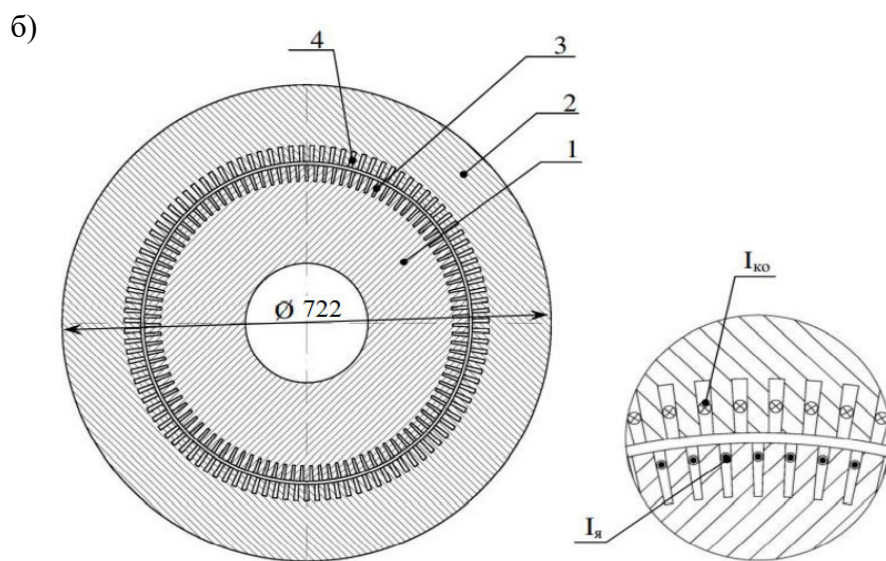
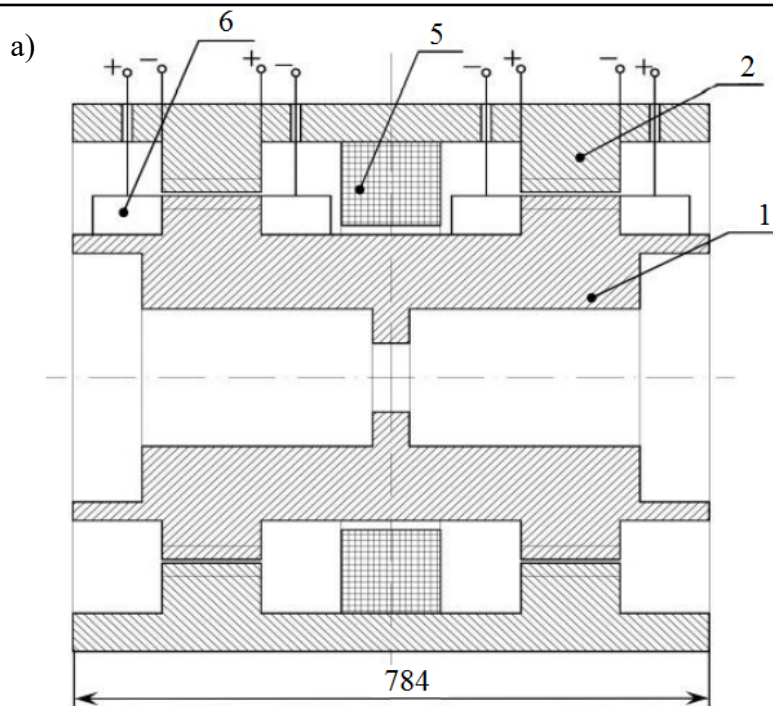
$$P_1 = 2p \cdot U_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}};$$

$$U_{\text{я}} = E - I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}} - I_{\text{я}} \cdot R_{\text{ко}} - U_{\text{т}};$$

$$E = \Phi_{\delta} \cdot n / 60,$$

где $U_{\text{я}}$, $I_{\text{я}}$ – соответственно напряжение и ток якоря; $R_{\text{я}}$ – полное сопротивление якоря на полюс; $R_{\text{ко}}$ – сопротивление компенсационной обмотки для одного полюса; $U_{\text{т}}$ – падение напряжения на токосъёме для одного полюса; E – ЭДС на один полюс; Φ_{δ} – магнитный поток в воздушном зазоре.

Значение Φ_{δ} определялось из расчёта поля возбуждения в программе FEMM.



1 – ротор; 2 – индуктор; 3 – пазы обмотки якоря; 4 – пазы компенсационной обмотки;
5 – обмотка возбуждения; 6 – токосъём

Рис. 3. Общий вид УГ: а – продольный вид; б – поперечный вид

Расчёт проводился для двух типов токосъёма: традиционного щёточного и катящегося с максимальным током якоря 16 кА. Это позволило их сравнить с машиной контактной сварки типа МТ-3001 с импульсным током 16 кА (см. табл. 1). В табл. 3 приведены потери в токосъёме и КПД генераторов для двух типов токосъёма: традиционного щёточного (со щётками МГСОА) и катящегося (с коническими роликами).

Таблица 3

Параметры УГ мощностью 145 и 200 кВт для двух типов токосъёма

| Параметры УГ | Значение параметра УГ-145 | Значение параметра УГ-200 |
|---------------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Длина ротора, м | 0,784 | 0,784 |
| Диаметр ротора (якоря), м | 0,515 | 0,426 |
| Масса ротора (якоря), кг | 1274 | 871 |
| Частота вращения максимальная, об/мин | 3000 | 4000 |
| Момент инерции, кг·м ² | 42,22 | 19,77 |
| Кинетическая энергия, МДж | 2,084 | 1,73 |
| $P_{ЭЛ}$ в ОЯ, КО, ОВ и шинах, Вт | 356,4 | 356,4 |
| $P_{ЭЛ}$ в токосъёме, Вт | 12 800/931 | 12 800/922 |
| $P_{МЕХ}$ в токосъёме, Вт | 9023/287 | 14720/257 |
| КПД УГ | 76,77/97,5 | 78,5/98,6 |
| Ток максимальный, кА | 16 | 16 |
| Напряжение якоря, В | 4,55 | 6,30 |

Примечание. ОЯ – обмотка якоря; КО – компенсационная обмотка; ОВ – обмотка возбуждения; $P_{ЭЛ}$ – потери электрические в токосъёме; $P_{МЕХ}$ – потери механические в токосъёме.

Из табл. 3 можно сделать вывод, что для достижения необходимой мощности и запаса энергии при снижении расчётной частоты вращения требуется увеличивать диаметр и массу ротора. При этом при меньшей частоте вращения обеспечивается более надёжная работа токосъёма.

Расчёты показали, что при переходе на катящийся токосъём электрические потери падают более чем в 13 раз, а механические – более чем в 30 раз, повышая КПД УГ примерно на 20 %. Это даёт возможность УГ с катящимся токосъёмом иметь энергетические показатели на уровне современных генераторов переменного тока, а по массогабаритным показателям приблизиться или превзойти конденсаторные машины. Для УГ мощностью 145 кВт (см. рис. 4) показаны графики изменения кинетической энергии и частоты вращения от количества импульсов тока величиной 16 кА длительностью в 1 с. Далее (см. рис. 5) представлены графики изменения тока и напряжения якоря УГ от количества импульсов с возможной зоной стабилизации тока и напряжения якоря путём регулирования поля возбуждения генератора. Зона регулирования достигает 20 % от уровня $U_{Я\text{ МАКС}}$.

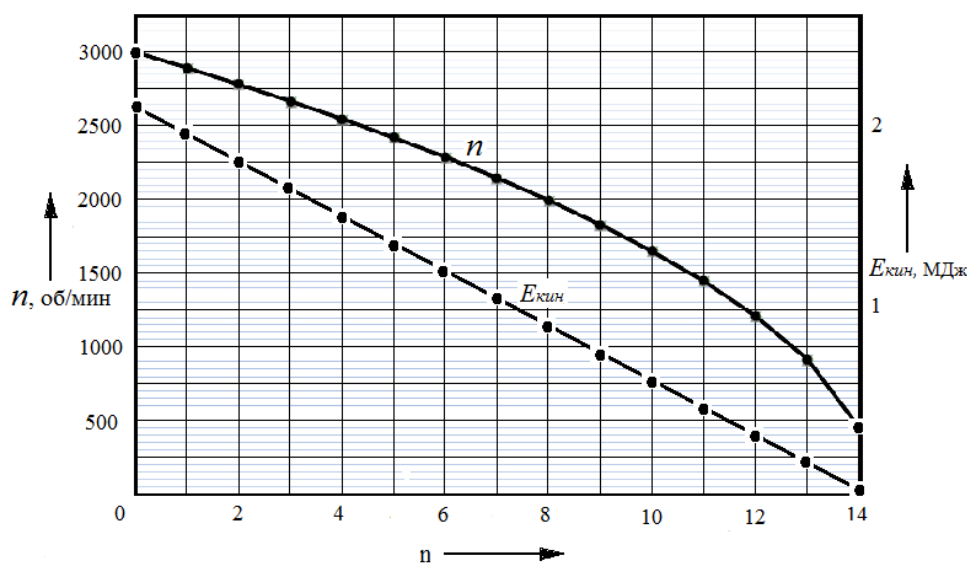


Рис. 4. Зависимость частоты вращения УГ от количества импульсов тока с одинаковой энергией

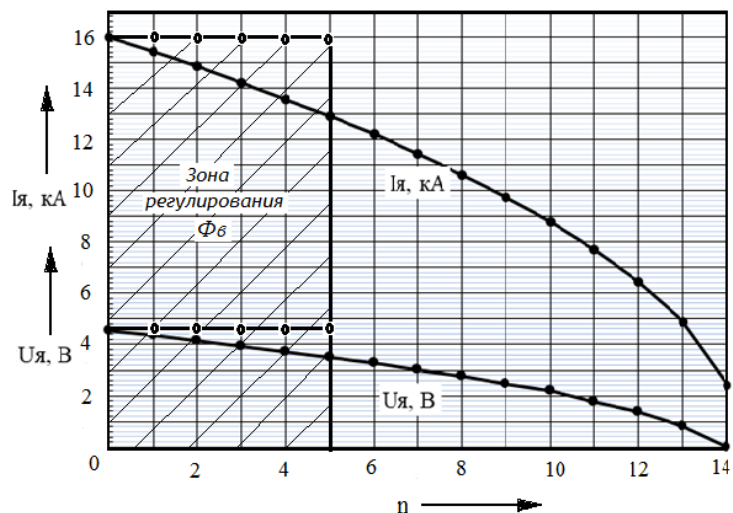


Рис. 5. Зависимость $U_{я}$ и $I_{я}$ от количества импульсов тока при свободном вращении УГ с выделенной областью поддержания стабильного тока с помощью регулирования Φ_{δ}

Сравнение удельной массы контактной машины на базе УГ (см. рис. 6) с конденсаторной машиной показывает существенное преимущество машины с инерционным накопителем энергии при повышении частоты вращения якоря УГ свыше 3...4 тыс. об/мин.

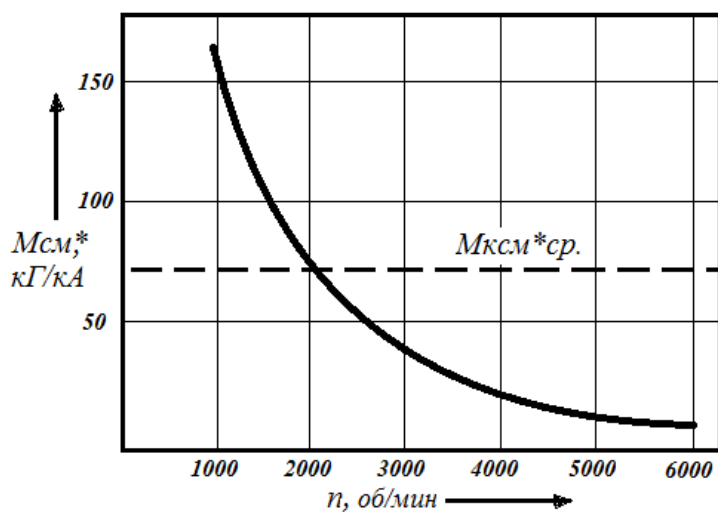


Рис. 6. Зависимость удельного показателя $M_{см}^*$ (кг/кА) преобразователя на базе УГ от частоты вращения якоря, где $M_{ксм}^*_{ср.} = 67$ кг/кА – среднее значение удельного показателя для конденсаторных машин (штрих-пунктирная линия)

Заключение. Анализ использования униполярного генератора в качестве источника питания для контактной сварки показал его перспективность и практическую осуществимость. Контактная сварочная машина с УГ превосходит конденсаторную машину по удельной энергоёмкости и по массогабаритным показателям при частоте вращения якоря более 2000 об/мин. При этом срок службы накопителя энергии сравним со сроком службы электродвигателей, который при правильной эксплуатации составляет более 15 лет. Проблема потерь в токосъёме униполярной машины решается с помощью использования катящегося токосъёма. Возможность использования такого токосъёма в униполярной машине доказана в работах [3; 8; 12; 14]. Накопление кинетической энергии УГ позволяет получать импульсы токов для всех видов контактной сварки: точечной, шовной и стыковой. Принцип инерционного накопителя позволяет получить большие сварочные токи от сравнительно маломощной сети. Расчёты показали, что в отличие от КМ в сварочных аг-

режатах с УГ можно осуществлять как «жесткие», так и «мягкие» режимы контактной сварки с длительностью импульса тока как доли секунды, так и более одной секунды. Форму импульса тока в «мягком» режиме можно задать путём регулирования поля возбуждения УГ. При этом надо контролировать тепловые процессы элементов УГ, которые зависят от продолжительности импульсов сварочного тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Банов, М. Д. Технология и оборудование контактной сварки: учеб. / М. Д. Банов. – М.: Академия, 2005. – 224 с.
2. Накопители энергии: учеб. пособие для вузов / Д. А. Бут, Б. Л. Алиевский, С. Р. Мизюрин, П. В. Васюкевич. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 398 с.
3. Геча, В. Я. Определение контактного сопротивления для токоёмки униполярной электрической машины / В. Я. Геча, А. Б. Захаренко, А. К. Надкин // Труды ВНИИЭМ «Вопросы электромеханики». – 2015. – Т. 145. – С. 3-7.
4. Геча, В. Я. Конструкция компенсационной обмотки униполярной электрической машины / В. Я. Геча, А. Б. Захаренко, А. К. Надкин // Труды ВНИИЭМ «Вопросы электромеханики». – 2014. – Т. 139. – С. 7.
5. Гостевская, А. Н. Исследование влияния параметров контактной стыковой сварки на зону термического влияния рельсов марки Э76ХФ / А. Н. Гостевская // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № III-1 (51). – С. 76-81.
6. Анализ электромеханических систем методами имитационного моделирования / С. Н. Иванов, К. К. Ким, А. А. Просолович, М. И. Хисматулин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № III-1 (51). – С. 29-38.
7. Катаев, Р. Ф. Теория и технология контактной сварки: учеб. пособие / Р. Ф. Катаев, В. С. Милютин, М. Г. Близник. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 144 с.
8. Ким, К. И. Исследование токов, индуцированных в жидкости с тензорной проводимостью бегущим магнитным полем / К. И. Ким, К. К. Ким, С. Н. Иванов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № VII-1 (55). – С. 4-10.
9. Ким, К. И. Критерии устойчивости режима самовозбуждения асинхронного жидкометаллического магнитогидродинамического генератора / К. И. Ким, К. К. Ким, С. Н. Иванов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № VII-1 (55). – С. 11-17.
10. Ким, К. К. Триботехнические характеристики элементов скольжения электромеханических преобразователей / К. К. Ким, С. Н. Иванов, А. В. Горбунов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № V-1 (61). – С. 113-116.
11. Основы технологии и построения оборудования для контактной сварки: учеб. пособие / А. С. Климов, И. В. Смирнов, А. В. Кудинов, Г. Э. Кудинова. – Тольятти: ТГУ, 2008. – 313 с.
12. Надкин, А. К. Исследование зонального токоёмки и реакции якоря для повышения эффективности униполярных электрических машин: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01 / Надкин Александр Каренович. – М., 2017. – 143 с.
13. Орлов, Б. Д. Технология и оборудование контактной сварки: учеб. для вузов / Б. Д. Орлов, А. А. Чакалев, Ю. В. Дмитриев. – М.: Машиностроение, 1986. – 352 с.
14. Патент № 146918 Российская Федерация, МПК H02K 31/02 (2006.01). Конструкция униполярной электрической машины с катящимися контактами: № 2014121245: заявлено 27.05.2014: опубликовано 20.10.2014 / Геча В. Я., Захаренко А. Б., Надкин А. К.; заявитель Закрытое акционерное общество «Московское техническое бюро». – 12 с.
15. Патент № 150209 Российская Федерация, МПК H02K 31/02 (2006.01). Конструкция обмотки якоря и компенсационной обмотки униполярной электрической машины: № 2014110526: заявлено 20.03.2014: опубликовано 10.02.2015 / Геча В. Я., Захаренко А. Б., Надкин А. К.; заявитель Закрытое акционерное общество «Московское техническое бюро». – 10 с.
16. Рыськова, З. А. Трансформаторы для электрической контактной сварки / З. А. Рыськова, П. Д. Федоров, В. И. Жимерева. – 3-е изд. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1990. – 424 с.
17. Argibay N. Copper-beryllium metal fiber brushes in high current density sliding electrical contacts / N. Argibay, J. A. Baresb, J. H. Keitha, G. R. Bournec, W. G. Sawyer // Wear – 2010 – Vol. 268 – P. 1230-1236.
18. Ashok K. New High Strength Copper-Tin-Zinc Alloy for Connectors and other Conductive Springs / Ashok K. Bhargava. A // Electronic Components and Technology Conference – 2000. – P. 1139-1146.