

## ЭЛЕКТРОПРИВОД МАЛОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ СВАРОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

*Разработана концепция построения транзисторного регулятора для электроприводов малой мощности с использованием оригинального принципа управления.*

*Выполнено изготовление и испытание в реальных объектах образцов регуляторов, характеристики которых при простом, но эффективном построении удовлетворяют всем требованиям систем, которые устанавливаются в сварочном оборудовании.*

**Ключевые слова:** сварка, механизация, автоматизация, системы, электропривод, регулирование, точность

Рациональное конструирование оборудования в соответствии с требованиями потребителя – необходимое условие современного рынка. В любой конструкции должны быть заложены все условия для обеспечения его успешной эксплуатации и минимизации затрат потенциальных заказчиков. Всё это в полной мере относится к механизированному и автоматическому оборудованию для дуговой сварки и наплавки сталей и сплавов алюминия.

Основу движущихся систем сварочных автоматов и полуавтоматов составляют различные приводы разных конструкций. В последнее время всё более используют регулируемые электроприводы.

Можно заметить, что в механизированном сварочном оборудовании используются электродвигатели постоянного тока мощностью не более 100 Вт. В автоматизированном оборудовании несколько более мощные электродвигатели, в том числе и трёхфазные [1].

Следует отметить, что и ранее и в настоящее время серийно регулируемые комплектные электроприводы для механизированного сварочного оборудования не выпускались ни в нашей стране, ни за рубежом. Каждая фирма – разработчик сварочного оборудования, как показывает анализ [2, 3], разрабатывали и в составе сварочных полуавтоматов производили электроприводы различных конструкций и разной сложности в зависимости от конкретного назначения полуавтоматов (тип сварочной проволоки, режимы, условия эксплуатации и др.).

Как правило, большинство этих электроприводов, исключая электроприводы с параметрическим регулированием, использовало в качестве силовых ключей тиристоры или, в последнее время всё более часто, транзисторы с различными структурами. Транзисторные регуляторы электроприводов имеют существенные преимущества перед другими практически во всех областях применения, а для сварочного оборудования в особенности, так как могут получать питание практически от любого источника, в частности от выходного напряжения (напряжения на дуге).

Традиционно регулируемые электроприводы имеют обратные связи, стабилизирующие частоту вращения вала электродвигателя при изменениях нагрузки. Достигается такая стабилизация введением обратных связей по напряжению на якоре электродвигателя (непосред-

ственное измерение), по ЭДС (в безтоковых паузах), с  $I_{я}R_{я}$  – компенсацией ( $I_{я}$ ,  $R_{я}$  – ток и сопротивление якорной цепи соответственно). Для улучшения динамических свойств комплектного электропривода и соответствующего механизма используют различные корректирующие структуры (ПИ, ПИД и др., в том числе их комбинации и гибкие связи, а также двухзонное регулирование). Всё это существенно усложняет систему регулирования электропривода.

В последнее время значительно повысились и расширились требования к электроприводам сварочного оборудования, в частности надёжности, диапазона регулирования, простоты конструкции и, особенно, жесткости механических характеристик. Так, например, для электропривода механизма подачи электродной проволоки из сплавов алюминия для ряда случаев поддержание установленной скорости подачи должно быть не хуже 2% [4]. Конструкции электроприводов, используемых в отечественном сварочном оборудовании не обеспечивает в полном объеме выполнение этих требований. Невозможность выполнить требование точности поддержания частоты вращения вала электродвигателя обуславливается использованием известных способов формирования и отработки соответствующих обратных связей по стабилизации рассматриваемого параметра.

**Целью настоящей работы является разработка рациональной конструкции регулируемого электропривода повышенной точности для применения в оборудовании дуговой механизированной и автоматической сварки.**

Использование обратной связи по частоте вращения вала электродвигателя или комбинации другого типа обратных связей, которые в той или иной мере могут являться аналогом прямого измерения частоты вращения, при пропорциональном регуляторе (П-регулятор) приводят к наличию ошибки регулирования, которая является следствием того, что система регулирования электропривода обрабатывает сигнал управления (рассогласование)  $U_p$ , который определяется выражением

$$U_p = U_3 - U_{o.c.}, \quad (1)$$

где  $U_3$ ,  $U_{o.c.}$  – сигналы задания уровня частоты вращения вала электродвигателя и обратной связи соответственно.

При П-регуляторе выражение (1) в виде сигнала управления может только стремиться к пределу

$$U_3 - U_{o.c.} \rightarrow 0. \quad (2)$$

Но именно при сигнале управления равном или близким к нулю, обеспечивается точное регулирование частоты вращения вала электродвигателя. Очевидно, что в этом случае практически никакого регулирования нет. Нам представляется возможным назвать в обобщённом виде такое регулирование односторонним или однополярным. Стремление уменьшить значение сигнала рассогласования по выражению (1) вызывает необходимость применения в регуляторе электропривода усилителей, что неизбежно ведёт к его усложнению.

На основании изложенного, а также, анализируя возможные варианты схемотехнического решения задачи повышения точности работы электропривода при очень простой конструкции, нами предложена схема транзисторного электропривода, работающего по принципу релейных электроприводов, но существенно отличающихся от них.

Схема электрическая принципиальная такого электропривода с обозначенным нами регулированием представлена на рис. 1.

Электропривод включает в себя, электродвигатель постоянного тока М1.1 с датчиком обратной связи в виде тахогенератора М1.2, силовой транзистор VT3, генератор, собранный на транзисторах VT1, VT2. Напряжение задания  $U_3$  определяется резистором R7, который под-

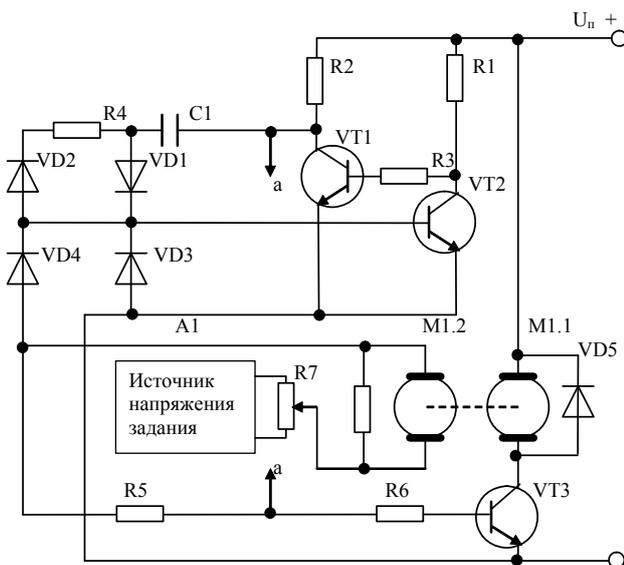


Рисунок 1 – Электропривод постоянного тока с двухсторонним регулированием частоты вращения вала.

ключён к стабилизированному источнику А1 (может быть цепь со стабилитроном).

Следует заметить, что тип используемых транзисторов не имеет значения, а некоторые узлы могут быть реализованы в микросхемном исполнении. Так нами в качестве силового транзистора использовались и обычные биполярные транзисторы и транзисторы с полевыми структурами.

Длительность импульса управления формируется цепочкой R2, C1, VD1, через которую ток поступает на базу VT2 до полного заряда конденсатора C1. Транзистор VT2 открывается, поэтому на базу VT1 приходит нулевой уровень напряжения. Заряженный конденсатор C1 ток не пропускает, поэтому транзистор VT2 закрывается, появляется ток на базе VT1, через который конденсатор C1 разряжается по цепочке R4, VD2, VD3, которая образует время паузы или остановку работы генератора на транзисторах VT1, VT2, если не поступает напряжение управления через диод VD4.

Рассмотрим более подробно работу электропривода, обратив внимание на то, что в нём применено три типа обратных связей:

1. положительная обратная связь через конденсатор C1, формирующая фронты включения и выключения импульсов;
2. положительная обратная связь через резистор R5, формирующая два порога срабатывания регулятора;
3. отрицательная обратная связь через тахогенератор, формирующая регулирующее напряжение в соответствии с (1).

Идеализованно принцип регулирования в электроприводе можно представить в виде диаграммы, представленной на рис. 2

Анализ работы рассматриваемого электропривода целесообразно вести с использованием достаточно простых, но показательных и точно выбранных (обоснованных) соотношений.

Рассмотрим момент когда  $U_3 = U_{o.c.}$ . При этом ток базы  $I_{б1}$  транзистора VT2 равен нулю и транзистор закрыт, а транзистор VT1 открыт и шунтирует базу силового транзистора VT3. Транзистор VT3 закрыт и напряжение питания на электродвигатель не поступает и он снижает частоту вращения. Равенство  $U_3 = U_{o.c.}$  нару-

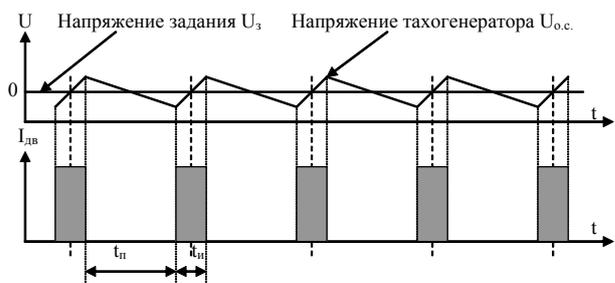


Рисунок 2 – Идеализированная диаграмма регулирования в двухстороннем регуляторе электропривода:  $t_n$ ,  $t_{ni}$  – времена действия импульсов тока и пауз соответственно

шается в соответствие с выражением (1), которое для двухстороннего управления можно уточнить в виде

$$U_3 - U_{o.c.} = +U_p \quad (3)$$

При снижении частоты вращения величина  $+U_p$  растёт до уровня напряжения, при котором ток базы транзистора VT2 становится равным  $I_{б1нз}$  – току начала генерирования импульса. Это приводит к открытию транзистора VT2 и закрытию транзистора VT1. Шунтирование с базы транзистора VT3 снимается и он открывается, подавая напряжение питания на электродвигатель, частота вращения вала которого повышается и вместе с тем растёт напряжение, снимаемое с тахогенератора  $U_{o.c.}$ . Во время снятия шунтирования с базы транзистора VT3 также снимается шунтирование с резистора положительной обратной связи R5. Через резистор R5 протекает ток  $I_{б1o.c.}$ , образуя ток базы транзистора VT2  $I_{б2o.c.}$ , который определяется в виде

$$I_{б2o.c.} = I_{б1нз} + I_{б1o.c.} \quad (4)$$

Характеристика генератора, состоящего из транзисторов VT1, VT2 в идеализированном виде для иллюстрации описания представлена на рис. 3.

При росте частоты вращения вала электродвигателя  $+U_p \rightarrow 0$  транзистор VT2 не закрывается потому, что суммарный ток через его базу составляет  $I_{б2o.c.} \rightarrow I_{б1o.c.}$  и достаточен для удержания его в открытом состоянии.

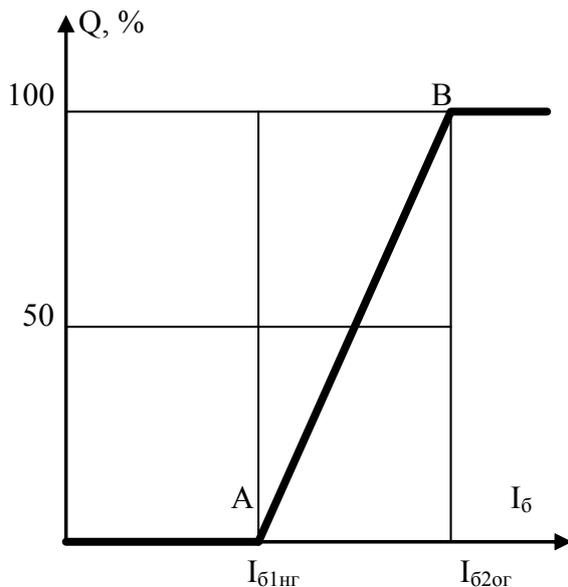


Рисунок 3 –Характеристика генератора, составленного из транзисторов VT1 и VT2:

Q – скажность генерируемых импульсов

Частота вращения вала электродвигателя продолжает увеличиваться и напряжение с тахогенератора  $U_{o.c.}$  начинает превышать напряжение задания  $U_3$ . При этом образуется новый уровень напряжения управления  $U_p$ , определяемый в виде

$$U_3 - U_{o.c.} = -U_p. \quad (5)$$

Отрицательное напряжение  $-U_p$  создаёт противоток  $I_{-U_p}$ , который, суммируясь с током  $I_{б1o.c.}$  через резистор R5, обеспечивает величину тока  $I_{б2з}$ , при котором транзистор VT2 закрывается, т.е.

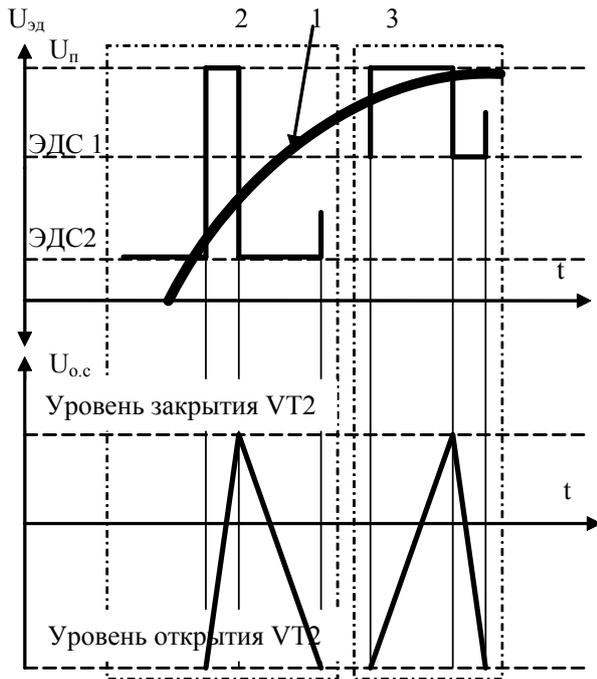
$$I_{б2з} = I_{б1o.c.} - I_{-U_p}. \quad (6)$$

Когда величина тока (6) ниже порога срабатывания транзистора VT2: он закрывается, обеспечивая закрытие силового транзистора VT3 и, соответственно безтоковую паузу электродвигателя. Именно через резистор R5 действует положительная обратная связь, обеспечивающая регулирование частоты вращения вала электродвигателя.

Рассмотрим более подробно, как в рассматриваемом электроприводе происходит поддержание заданного числа оборотов вала электродвигателя при изменении нагрузки, что весьма характерно для ряда узлов оборудования для дуговой сварки плавящимся электродом. Особенно это проявляется в системах подачи электродной проволоки полуавтоматов с длинными шланговыми держателями. На рис. 4. графически представлен алгоритм отработки возмущения при изменении момента нагрузки на валу приводного электродвигателя. Для простоты представления работы транзистора VT2, а, следовательно, и силового транзистора VT3 и, соответственно, электродвигателя изменение нагрузки представлено в виде прямолинейных участков. Несколько более точно на рис.5 графически представлен принцип изменение частоты вращения вала электродвигателя при изменении уровня напряжения задания  $U_3$ . Напряжения ЭДС1 и ЭДС2 соответствуют малому и большому уровню напряжения задания.

Особо отметим, что в при формировании импульсов открытия и закрытия транзисторов VT2 и VT3 время действия импульса и паузы образуется в соответствие со скоростью уменьшения частоты вращения вала электродвигателя, которое, естественно, зависит от момента на валу электродвигателя, что следует из основного уравнения движения электропривода [5]

$$M_n - M_c = J \sum \frac{d\omega}{dt}, \quad (7)$$



**Рисунок 5** – Принцип регулирования частоты вращения при изменении напряжения задания: 1 – изменение тока электродвигателя в зависимости от уровня напряжения задания; 2 – формирование импульса управления при малом уровне задания; 3 – формирование импульса управления при большом уровне задания

где  $M_n, M_c$  – момент, на валу электродвигателя и момент сопротивления соответственно;  $J_\Sigma$  – суммарный момент инерции;  $\omega$  – частота вращения вала электродвигателя.

Очевидно, что чем больше момент нагрузки на валу, тем выше скорость снижения частоты вращения и короче время действия паузы, но при этом чем больше момент нагрузки на валу, тем меньше скорость возрастания частоты вращения во время действия импульса и, естественно, больше длительность импульса. Таким образом длительность импульса определяется временем увеличения частоты вращения (рост ЭДС электродвигателя) между двумя уровнями транзисторов VT2 и VT3 (закрыты - открыты). Длительность паузы зависит от времени снижения частоты вращения (спад ЭДС). Скважность импульсов, поступающих на якорь электродвигателя, как следует из изложенного, определяется условиями его работы.

Следует особо подчеркнуть, что регулятор электропривода обрабатывает не просто изменение величины на валу электродвигателя момента или задания – он практически обрабатывает скорость изменения возмущений

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt}, \quad (8)$$

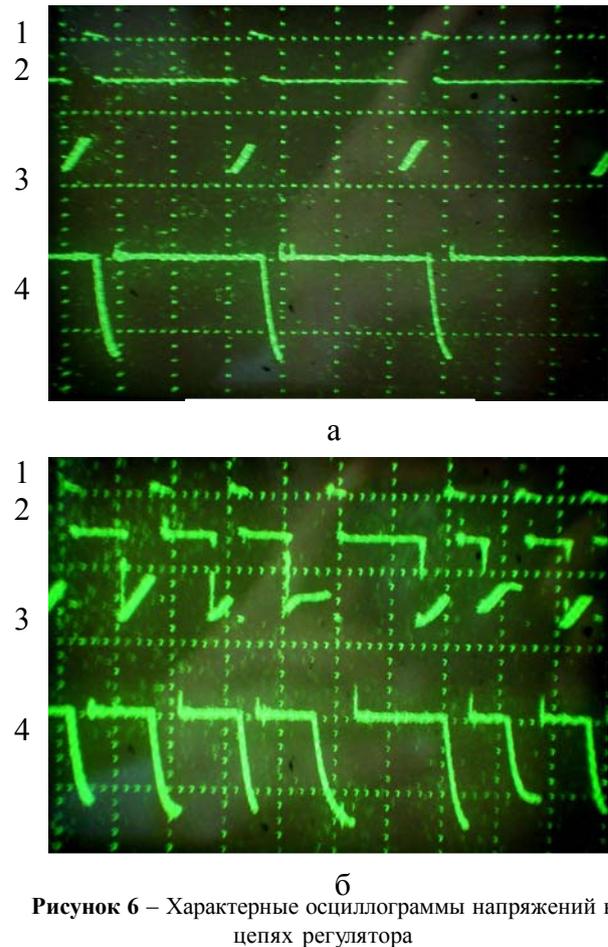
где  $\varepsilon$  – угловое ускорение.

Отработка величин пропорциональных скоростям изменений возмущений позволяет при достаточной простоте технических решений получить высокие показатели точности регулирования.

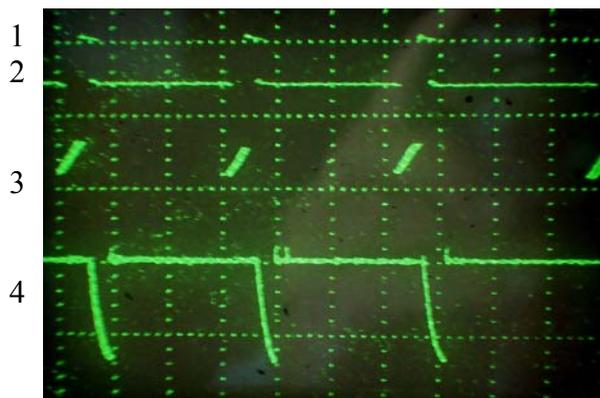
Экспериментальные исследования электропривода проводились с применением электродвигателя ДПУ87-75 (мощность 75 Вт, номинальная частота вращения вала  $\omega_n = 16,7 \text{ C}^{-1}$ ) со встроенным тахогенератором ТП-80. Настройка схемы проводилась с обеспечением следующих основных параметров:  $I_{\theta 1} = 1,5 \text{ mA}$ ;  $I_{\theta 2 \text{ оэ}} = 2,0 \text{ mA}$ . При этом обеспечивалась частота следования импульсов 200 Гц.

Характерные осциллограммы напряжений в некоторых важных точках схемы для разных режимов работы электропривода представлены качественно на рис. 6. На рис. 6 а даны осциллограммы стационарного режима работы электропривода, а на рис. 6 б – с импульсной нагрузкой.

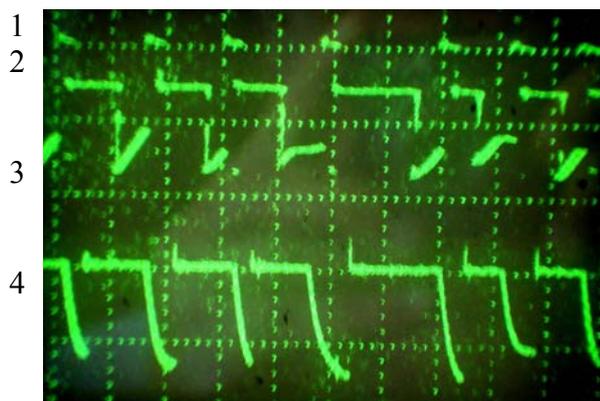
Подтверждена ожидаемая в высокой степени инвариантность (квазиинвариантность) электропривода к параметрическим и координатным возмущениям. Так при изменении момента нагрузки в диапазоне  $(0,3 \dots 1,2) M_n$  ( $M_n$  – номинальный момент) в диапазоне регули-



**Рисунок 6** – Характерные осциллограммы напряжений в цепях регулятора



а



б

Рисунок 6 – Характерные осциллограммы напряжений в цепях регулятора

рования частоты вращения  $(0,2 \dots 1,0) \omega_n$  ( $\omega_n$  – номинальная частота вращения) отклонения в частоте вращения вала не превысили 1,0% внизу диапазона регулирования, а при диапазоне  $(0,08 \dots 1,0) \omega_n$  – 2,0% внизу диапазона регулирования.

Простота и эффективность разработанного электропривода, его высокая помехоустойчивость позволяют широко использовать его в различных системах сварочного оборудования. В рамках настоящей работы электропривод был применён в наиболее проблематичном узле – механизме подачи электродной проволоки полуавтомата многовариантного применения – ПШ107В.

Перспективой для дальнейшего развития предложенной технической разработки является решение с использованием в качестве датчиков частоты вращения вала параметров режима электродвигателя.

## ВЫВОДЫ

1. Разработанный транзисторный электропривод с двухсторонним регулированием для установки в сварочное оборудование при очевидной простоте конструкции обеспечивает высокую степень инвариантности к основному типу возмущения – моменту на валу приводного электродвигателя.

2. Электропривод с двухсторонним регулированием близок по концепции к электроприводам с релейным принципом функционирования [6,] или автоколебательным электроприводам [7], однако отличается от них по способу получения режима регулирования с использованием дополнительных обратных связей.

3. По нашему мнению разработанный и рассмотренный в статье транзисторный электропривод малой мощности с двухсторонним регулированием может быть предложен для реализации в микросхемном исполнении, например по типу ИЛ33153Р или подобным с введением необходимых защит.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРИ

1. Лебедев В. А. Современное механизированное оборудование для сварки и наплавки и его технико-технологические возможности. / В. А. Лебедев., С. Ю. Максимов. – Киев : Основа, 2012. – 392 с.
2. Лебедев В. А. Международная выставка «Сварка Украины 2002» // Автомат. сварка. – 2002. – № 6. – С. 56–59
3. Можайский В. А. Сварочное оборудование фирмы Lincoln Electric / В. А. Можайский, О. В. Колупанов, Ф. В. Квасов // Сварочное производство. – 1998. – № 8. – С. 37–41.
4. Зусин В. Я. Сварка и наплавка алюминия и его сплавов / В. Я. Зусин. – Мариуполь. Рената, 2004. – с. 468
5. Ключев В. И. Теория электропривода / В. И. Ключев. – М. : Энергоатомиздат, – 1985. – 560 с.
6. Попов Е. П. Теория нелинейных систем автоматического управления и регулирования / Е. П. Попов. – М. : Наука, 1979. – 255 с.
7. Лебедев В. А. Автоколебательные транзисторные электроприводы постоянного тока для сварочного оборудования ИЭС им. Е. О. Патона / В. А. Лебедев, В. Г. Новгородский // Сварочное производство 2003. – № 8. – С. 26–31.

Статья поступила в редакцию 27.04.2015  
После доработки 27.05.2015

Лебедев В. А.

Докт. техн. наук, ІЕЗ ім. Е.О. Патона, НАН України

### ЕЛЕКТРОПРИВІД МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ ДЛЯ ЗВАРЮВАЛЬНОГО УСТАТКУВАННЯ

*Розроблено концепцію побудови транзисторного регулятора для електроприводів малої потужності з використанням оригінального принципу управління.*

*Запропонований принцип регулювання близький до релейного або коливального типу електроприводу, проте відрізняється від нього більш високим ступенем інваріантності до змін моменту завантажень на валу приводного електродвигуна.*

*Особливістю розробки є те, що регулятор електроприводу відпрацьовує не просто зміна величини на валу електродвигуна моменту або завдання - він практично відпрацьовує швидкість зміни збурень.*

*Показано, що нова розробка електроприводу враховує особливості роботи основних вузлів механізованого та автоматичного обладнання для дугового зварювання електродом, але може бути використані і в інших об'єктах промисловості.*

*Виконано виготовлення та випробування в реальних об'єктах зразків регуляторів, характеристики, яких при простому, але ефективному побудові задовольняє всім вимогам систем, які встановлюються в зварювальному обладнанні.*

*Запропоновано розширити застосування розглянутого електроприводу при його реалізації в мікросхемному виконанні.*

**Ключові слова:** зварювання, механізація, автоматизація, системи, електропривід, регулювання, точність.

Lebedev V. A.,

Doctor of science PWI. EO Paton, NASU, Ukraine

### LOW POWER ELECTRIC DRIVE FOR WELDING EQUIPMENT

*The concept of transistor controller construction for low-power electric drives using the original principle of control is presented.*

*The proposed principle of regulation is close to the relay or oscillatory type actuator, but differs from it by the higher degree of invariance to changes in torque downloads on drive motor shaft.*

*The feature of the development is that the drive controller fulfills not just a change in the value on the torque motor shaft or jobs - it fulfills almost the rate of disturbances change.*

*It is shown that new development takes into account the drive features of the basic units of mechanized and automated equipment for arc welding, but can be used in other industrial facilities.*

*Manufacture and testing facilities are performed in real samples regulators, which characteristics in a simple but efficient construction meets all requirements of systems that are installed in the welding equipment.*

*It is proposed to expand the use of electric considered at its implementation in integrated circuit design.*

**Keywords:** welding, mechanization, automation systems, electric, regulation, precision

### REFERENCES

1. Lebedev V. A., Maksimov S. Yu. *Sovremennoe mehanizirovannoe oborudovanie dlya svarki i naplavki i ego tehniko-technologicheskie vozmozhnosti.* Kiev, Osnova, 2012, 392 p.
2. Lebedev V. A. *Mezhdunarodnaya vystavka Svarka ukrainy 2002, Avtomat. Svarka, 2002, No 6, pp. 56–59*
3. Mozhayskiy V. A., Kolyupanov O. V., Kvasov F. V. *Svarochnoe oborudovanie firmy Lincoln Electric, Svarochnoe proizvodstvo, 1998, No 8, pp. 37–41.*
4. Zusin V. Ya. *Svarka i naplavka alyuminiya i ego splavov.* Mariupol, Renata, 2004, 468 p.
5. Klyuchev V. I. *Teoriya elektroprivoda.* Moscow, Energoatomizdat, 1985, 560 p.
6. Popov E. P. *Teoriya nelineynykh sistem avtomaticheskogo upravleniya i regu-lirovaniya.* Moscow, Nauka, 1979, 255 p.
7. Lebedev V. A., Novgorodskiy V. G. *Avtokolebatelnyie tranzistornye elektroprivody postoyannogo toka dlya svarochnogo oborudovaniya IES im. E.O. Patona. Svarochnoe proizvodstvo 2003, No 8, pp. 26–31.*