

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЛАЗЕРНЫХ УСТАНОВОК

М. В. Мостовской¹, В. В. Слепцов², Н. Н. Куликова³

^{1,2,3} МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия
^{1,2,3} mvmost@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматриваются актуальные направления развития регулируемого электропривода – повышение эффективности информационно-измерительных и управляющих систем. *Материалы и методы.* Показана необходимость в совершенствовании методов управления регулируемым электроприводом путем сравнительного анализа информационно-измерительных и управляющих систем электроприводов с целью повышения показателей надежности. Рассматривается принцип работы информационно-измерительной и управляющей системы электропривода с повышенными показателями надежности. *Результаты и выводы.* Проведен сравнительный расчет надежности электроприводов на основе векторного и предлагаемого способа управления.

Ключевые слова: информационно-измерительная и управляющая система, электропривод, лазерные установки, надежность, векторное управление, прямое управление, вентильный двигатель, вероятность безотказной работы

Для цитирования: Мостовской М. В., Слепцов В. В., Куликова Н. Н. Повышение надежности информационно-измерительной и управляющей системы электропривода лазерных установок // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1. С. 62–71. doi:10.21685/2307-4205-2023-1-8

INCREASING THE RELIABILITY OF THE INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEM OF THE ELECTRIC DRIVE OF LASER INSTALLATIONS

M.V. Mostovskoy¹, V.V. Sleptsov², N.N. Kulikova³

^{1,2,3} MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia
^{1,2,3} mvmost@yandex.ru

Abstract. *Background.* The actual directions of development of an adjustable electric drive are considered – increasing the efficiency of information-measuring and control systems. *Materials and methods.* The need to improve the methods of control of an adjustable electric drive is shown by a comparative analysis of information-measuring and control systems of electric drives in order to improve reliability indicators. The principle of operation of the information-measuring and control system of the electric drive with increased reliability indicators is considered. *Results and conclusions.* A comparative calculation of the reliability of electric drives based on the vector and proposed control methods.

Keywords: information-measuring and control system, electric drive, laser technological installations, reliability, vector control, direct control, brushless motor, probability of failure-free operation

For citation: Mostovskoy M.V., Sleptsov V.V., Kulikova N.N. Increasing the reliability of the information-measuring and control system of the electric drive of laser installations. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(1):62–71. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2023-1-8

Введение

Станкостроение – одна из ведущих отраслей промышленности, целью которой является разработка, производство и модернизация оборудования широкого спектра применения [1]. К номенклатуре выпускаемых станкостроением изделий относятся металлорежущие и деревообрабатывающие станки, кузнечно-прессовое оборудование, литейные машины, печи для термической обработки, промышленные роботы и т.д.

В последнее десятилетие в США, Европе и России можно выделить три основных направления развития станкостроительной отрасли: повышение уровня автоматизации и устранение участия чело-

века в производственном процессе, повышение производительности (как отдельных станков, так и производственных линий), а также повышение качества и эффективности выпускаемых машин.

На производствах среднего и точного машиностроения большое количество технологических операций, связанных со сваркой, упрочнением, резкой, гравировкой, маркировкой, сверлением и других различных материалов, выполняется с использованием лазерных технологических установок (далее – лазерных установок). Широкое применение лазерных установок обусловлено рядом преимуществ: отсутствие механического воздействия на обрабатываемый материал; возможность выполнения сложного контурного раскроя в материалах любой твердости; чистота среза обрабатываемой заготовки и отсутствие внутренних механических напряжений; высокая точность и производительность; безотходность операций.

Среди российских производителей оборудования для лазерной прецизионной обработки признанным лидером является ООО Научно-производственный центр «Лазеры и аппаратура ТМ». Примеры лазерных установок, предназначенных для сварки и прецизионной резки, производства ООО НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ» представлены на рис. 1

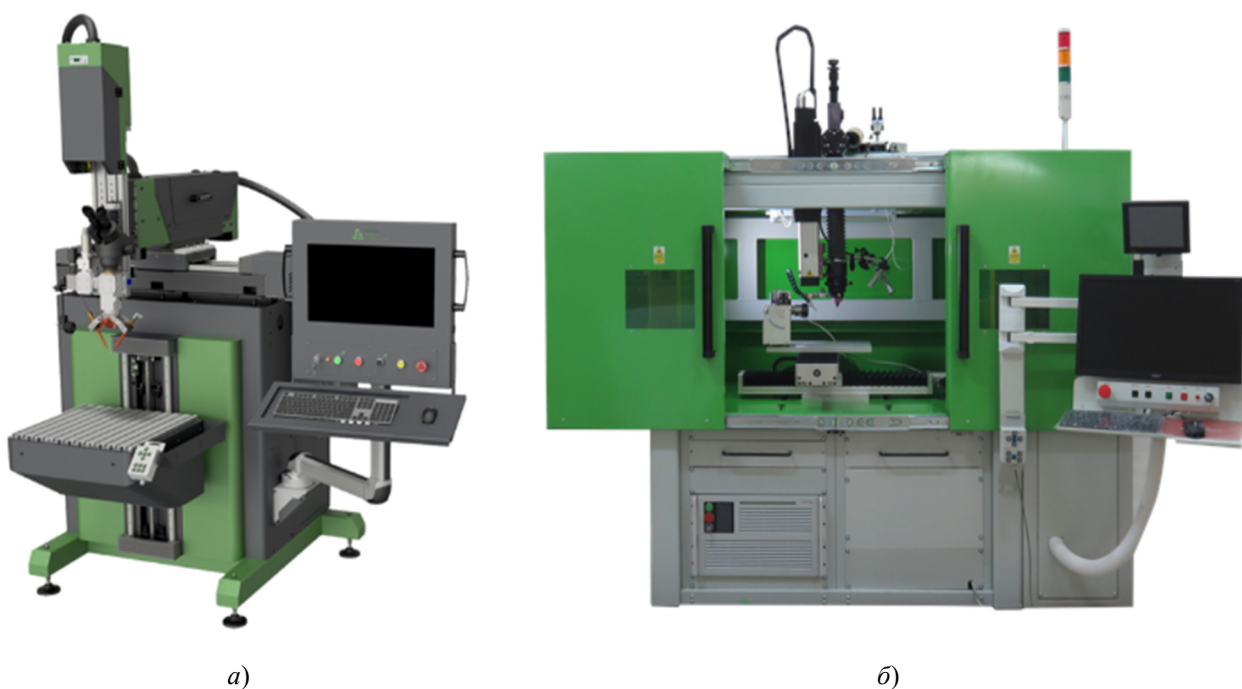


Рис. 1. Лазерные установки производства НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ»:
а – станок лазерной сварки металлов МЛК4-QCW;
б – универсальный станок размерной обработки МЛ4-QCW

В настоящее время ООО НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ» разрабатывает серию прецизионных и ультрапрецизионных лазерных станков (в том числе и пятикоординатных), отличающихся повышенной точностью и производительностью за счет применения оригинальных линейных и ротационных двигателей [2, 3], а также электроприводов на их основе.

Следует отметить, что в России не производятся линейные электроприводы подачи. Исключение составляет предприятие ООО «НПК Морсвязавтоматика», которое производит линейные электроприводы подачи в ограниченных количествах, с применением элементной базы фирмы «Hiwin».

Под влиянием зарубежных ограничительных мер на российскую экономику ставится задача импортозамещения элементной базы производимых станков, приборов и систем автоматики, расширение диапазона применения производимой продукции и снижение общей себестоимости изделия.

Разработка и производство собственных линейных и ротационных двигателей для лазерных установок ООО НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ» влечет за собой и создание ИИУС электропривода. Разрабатываемый электропривод должен отличаться повышенными динамическими, метрологическими и силовыми показателями, технологичностью, надежностью и низкой себестоимостью.

По данным ООО НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ» известно, что 30–40 % производственного брака при лазерной обработке возникает по вине отказов или сбоя технологического оборудования.

Наряду с работами по созданию наиболее эффективных конструкций лазерных установок требуется совершенствование технологий их изготовления, повышение надежности, а также улучшение эксплуатационных характеристик. Эти задачи должны решаться комплексно в процессе технологического проектирования и изготовления лазерных установок.

При проектировании и производстве лазерных установок наиболее трудоемким и затратным элементом является координатная система, состоящая из комплекта электроприводов, осуществляющих перемещение лазерного инструмента, кинематической схемы, датчиков и оптической системы [3].

Современное развитие лазерных установок характеризуется интенсификацией режимов работы, усложнением конструкции и элементов подсистемы автоматического управления процессами позиционирования и перемещения лазера. Снижение производственного брака достигается за счет изменения и совершенствования методов управления, а также дублирования отдельных элементов структуры.

Одним из наиболее перспективных и важных направлений общего повышения надежности лазерных установок является совершенствование электропривода. Современный электропривод состоит из электродвигателя (линейного или ротационного) и информационно-измерительной и управляющей системы (ИИУС).

Повышение надежности ИИУС электропривода координатных систем станков (лазерных установок) может дать большой экономический эффект в масштабах целой отрасли.

Для повышения надежности электроприводов, применимых в составе лазерных установок, следует руководствоваться следующими рекомендациями:

1. Для регулирования и настройки на оптимальный режим работы ИИУС электропривода должно быть предусмотрено минимальное количество настроечных элементов.

2. Конструкция ИИУС электропривода выполняется в виде модульной системы, установленной в общий шкаф управления лазерных установок. Подобное техническое решение обеспечивает удобство настройки во время эксплуатации, ремонта и технического осмотра.

3. Повышение надежности электропривода за счет введения различного рода избыточности, под которой подразумевается использование дополнительных технических средств, превышающих минимально необходимые для выполнения заданных функций [4].

4. Повышение надежности электропривода за счет совершенствования структурной схемы и изменения общей совокупности связей элементов (устранение некоторых элементов, упрощение схемы) электропривода.

Согласно приведенным рекомендациям ясно, что наиболее эффективным инструментом общего повышения надежности является применение подходов, изложенных в пунктах 3, 4. Оба подхода основаны на изменении совокупности связей элементов структурной схемы электропривода путем введения каналов резервирования или устранения некоторых элементов.

С точки зрения технической реализации резервирование может быть самым разнообразным и предусматривать резервирование ИИУС электропривода целиком или отдельных компонентов.

Введение в схему регулируемого электропривода дополнительных каналов резервирования приводит к увеличению массы, габаритных размеров и стоимости конечного изделия, поэтому наиболее привлекательным и экономически целесообразным способом повышения надежности электропривода является изменение совокупности связей управляющих элементов электропривода.

Под влиянием зарубежных ограничительных мер на российскую экономику поставлены задачи импортозамещения элементной базы приборов и систем автоматики, расширения диапазона применения производимой отечественной продукции и снижения общей себестоимости изделий и др.

В связи с вышесказанным встает вопрос о снижении затрат на производство разрабатываемых ИИУС электропривода промышленного назначения за счет упрощения конструкции, снижения времени настройки и регулировки, а также за счет применения отечественной элементной базы.

Сравнительный анализ ИИУС электропривода

Для увеличения надежности, точности, улучшения динамических и эксплуатационных характеристик ведущие мировые производители применяют в составе промышленных роботов и координатных систем станков синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ). СДПМ является наиболее перспективным в диапазоне малых и средних мощностей в режиме вентильного двигателя

(ВД), что приближает его характеристики к двигателю постоянного тока (ДПТ), который считается эталонным [5–7].

Для следующих электроприводов координатных систем на базе СДПМ применяют два основных способа управления: векторный и прямой. ИИУС электропривода на основе векторного управления позволяет существенно увеличить диапазон регулирования скорости, точность регулирования и быстродействие. Структурная схема ИИУС электропривода, основанная на методе векторного управления, представлена на рис. 2.

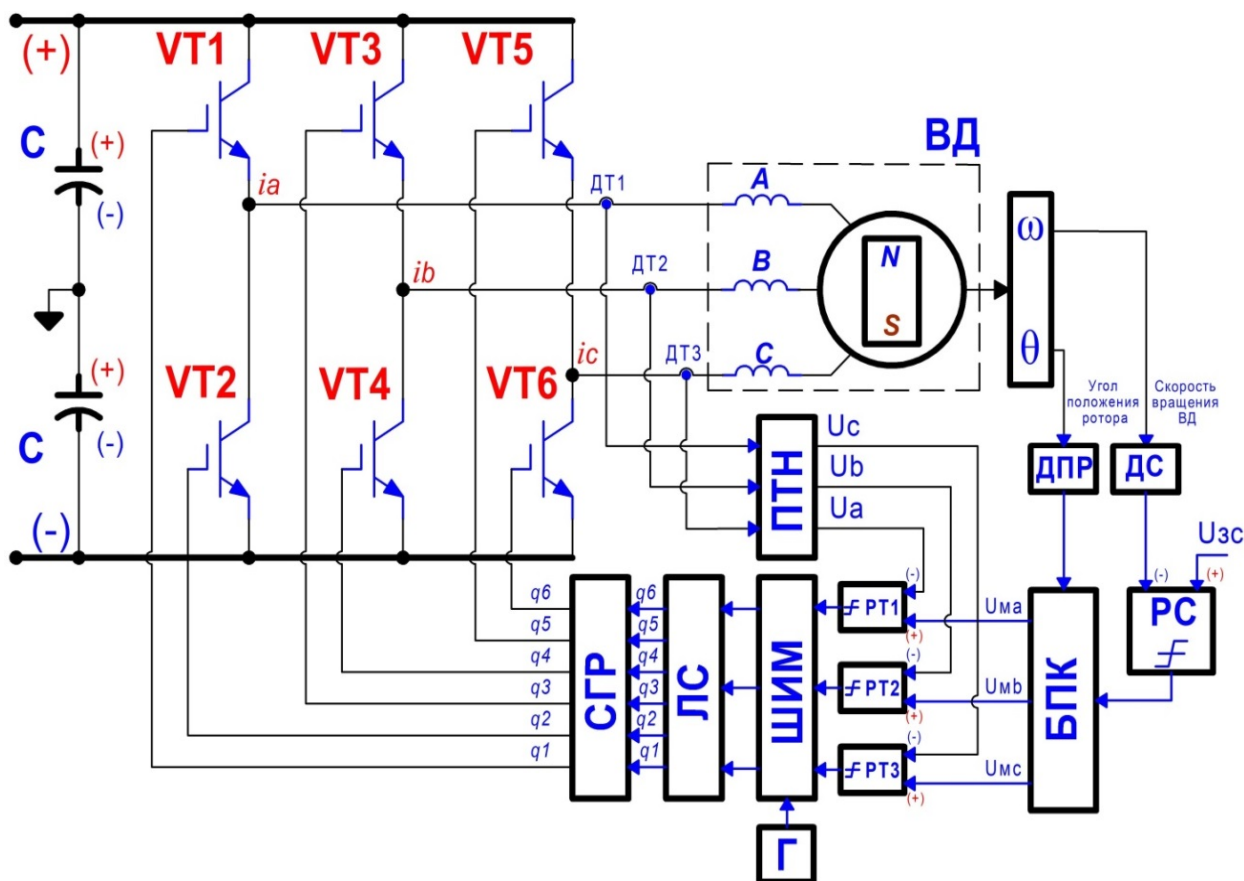


Рис. 2. ИИУС электропривода векторного управления: РС – регулятор скорости; БПК – блок преобразователя координат; РТ1–РТ3 – регуляторы тока; ШИМ – широтно-импульсный преобразователь; Г – генератор пилообразных сигналов; ЛС – логическая схема; СГР – схема гальванической развязки; ВД – вентиляльный двигатель; ДТ1–ДТ3 – датчики тока; ПТН – преобразователь ток/напряжение; ДПР – датчик положения ротора; ДС – датчик скорости; $U_{зс}$ – напряжение задания скорости; $U_{ма}$, $U_{мб}$, $U_{мс}$ – напряжение задания момента фаза A , B , C ; U_a , U_b , U_c – напряжение пропорциональное току в фазах A , B , C

Отличительной особенностью ИИУС электропривода векторного управления является наличие БПК и трехконтурной системы коррекции момента (регулятор тока используется для каждой фазы). Задачей БПК является формирование управляющих сигналов задания момента для каждой фазы двигателя, представляющих собой напряжение синусоидальной формы, амплитуда которых определяется выходным сигналом РС. Принципиальная электрическая схема цифроаналогового БПК (без учета подтягивающих резисторов) представлена на рис. 3.

Схема БПК работает следующим образом. На выходе регулятора скорости формируется сигнал задания момента U_m , который суммируется с сигналом с датчика скорости (определяет требуемую скорость вращения) и поступает на вход преобразователя напряжение/частота (ПНЧ). Импульсы с ПНЧ поступают на вход 8-разрядного счетчика (на $d1$ или на $d2$ в зависимости от знака U_m).

Линейно нарастающий восьмиразрядный код со счетчиков на микросхемах DD1 и DD2 (K555IE7) преобразуется в код синуса (микросхема DD3) и сдвинутого на 120° синуса (микросхема DD4), а далее с помощью умножающих ЦАПов преобразуется в аналоговые сигналы с амплитудой, пропорциональной сигналу U_m . На выходе операционного усилителя А5 формируется синус, сдвинутый на 240° . Эти три синуса поступают на входы соответствующих регуляторов токов (A , B , C).

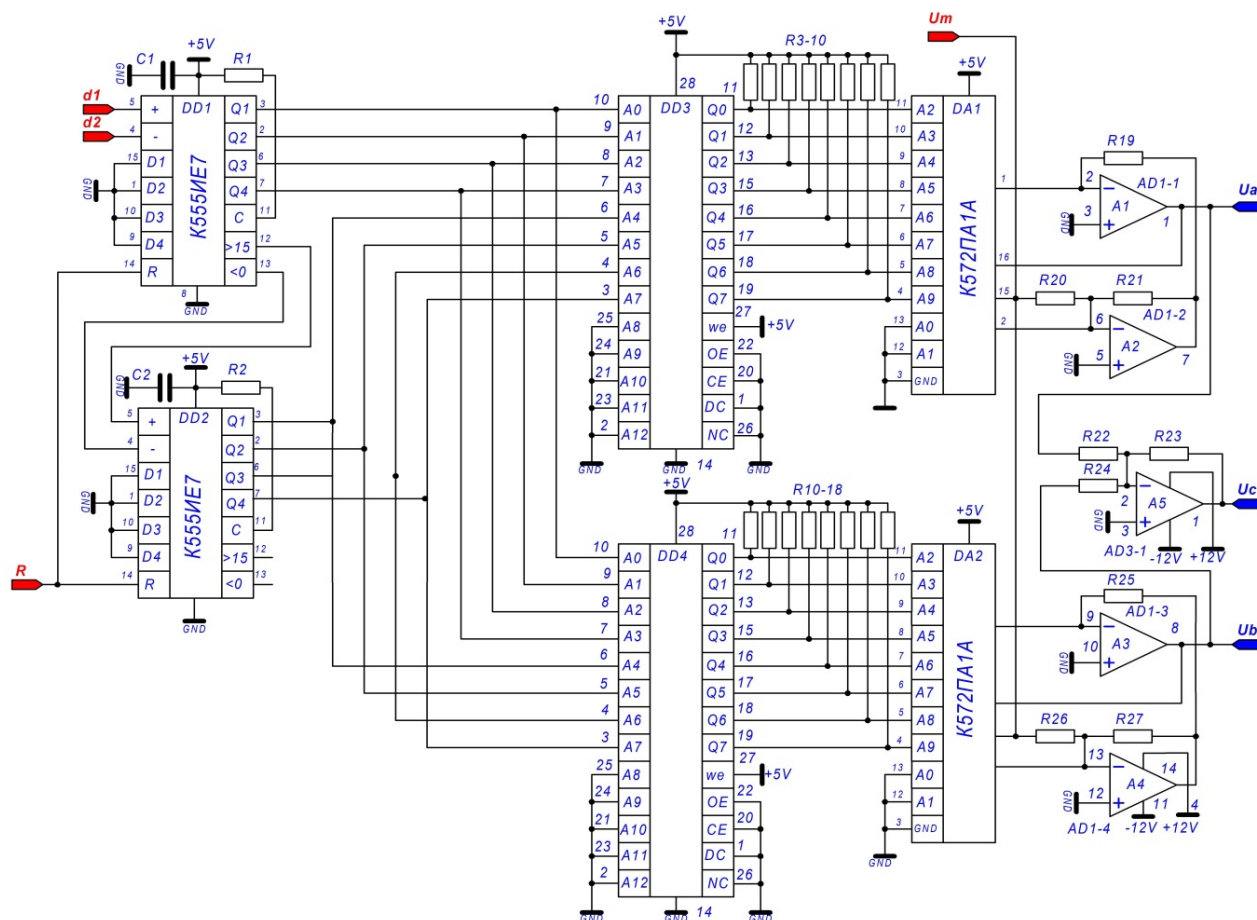


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема блока преобразования координат

К главным достоинствам ИИУС электропривода с векторным управлением относится широкий диапазон регулирования скоростей (более 10 000), низкий уровень колебания скоростей во всем диапазоне регулирования, высокое быстродействие системы, полоса пропускания частот до 200 Гц.

К недостаткам данных систем можно отнести сложность настройки (перенастройки) и ремонта, высокую стоимость, невысокую надежность.

В статьях [1, 8, 9], посвященных определению необходимых технических характеристик ИИУС электроприводов для лазерных установок, предлагается оригинальная структурная схема ИИУС электропривода на базе ВД, отличительной особенностью которой является использование лишь одного подчиненного контура тока. На основании практических и теоретических исследований, представленных в работах [1, 8, 9], установлено, что предлагаемая ИИУС электропривода соответствует ГОСТ 27803-91 «Электроприводы, регулируемые для металлообрабатывающего оборудования и промышленных роботов. Технические требования», имеет необходимые технические характеристики и может быть использована в составе координатных систем лазерных установок. В статье [1] приведены экспериментальные результаты исследования разработанной ИИУС электропривода. Полоса пропускания частот замкнутого контура скорости электропривода составила 123 Гц, диапазон регулирования скорости составил 9500. Получившиеся результаты полностью удовлетворяют требованиям, предъявляемым к ИИУС электропривода, приведенным в статье [8]. По техническим характеристикам предлагаемая ИИУС электропривода почти не уступает системам на основе векторного управления, но имеет более высокие показатели надежности, что обусловлено устранением необходимости в трехконтурной системе коррекции величины тока.

Устранение трехконтурной системы коррекции величины тока с получением необходимых технических характеристик (для лазерных установок) достигается за счет изменения совокупности связей структуры ИИУС электропривода. Отличительной особенностью разработанной ИИУС электропривода является введение блока перемножения выходных сигналов регулятора тока и регулятора скорости [1, 10]. Структурная схема предлагаемой ИИУС электропривода повышенной эффективности представлена на рис. 4.

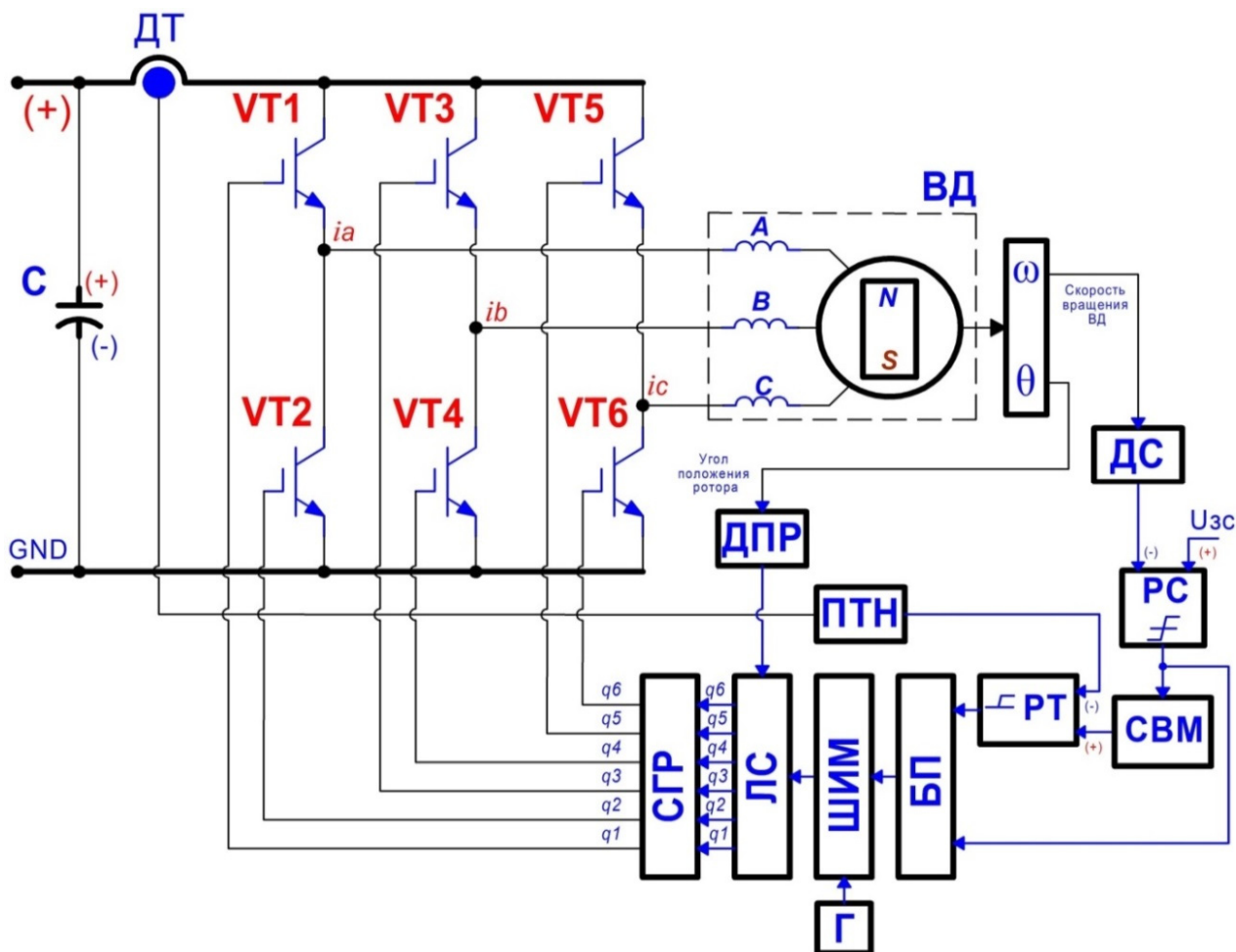


Рис. 4. ИИУС электропривода повышенной надежности:
 БП – блок перемножения; СВМ – схема выделения модуля

Подчиненный контур коррекции величины тока состоит из РТ, БП, ШИМ, Г и ДТ. РТ представляет собой П-регулятор, настроенный на технический оптимум, имеющий однополярный выходной сигнал коррекции величины тока, поступающий на парный вход схемы БП. Для определения направления вращения и увеличения быстродействия системы на второй вход БП подается выходной сигнал РС, варьирующийся в диапазоне $\pm 10\text{В}$. Измерение величины тока осуществляется при помощи ДТ (шунтирующий резистор), который устанавливается на положительном полюсе источника питания схемы силового преобразователя и схемы ПТН, представляющей собой дифференциальный усилитель с гальванической развязкой по входу. Задачей ПТН является преобразование, масштабирование и фильтрация сигнала ДТ. Для управления силовыми IGBT транзисторами используется ЛС, которая может быть выполнена на микроконтроллере или ПЗУ. Длительность управляющих импульсов ЛС определяется ШИМ, преобразующим выходной сигнал БП.

В обеих схемах ИИУС электропривода применяется двойной контроль величины тока. Измерение величины тока в подчиненном контуре обратной связи осуществляется с помощью компенсационного датчика Холла, а контроль величины тока для защиты системы от перенапряжения осуществляется шунтирующим резистором.

Представленное техническое решение приводит к упрощению схемы ИИУС электропривода, снижению инерционности системы, упрощению алгоритма настройки, уменьшению цены изделия и повышению надежности.

Сравнительный расчет надежности ИИУС электропривода

Согласно общей теории расчета надежности автоматизированных электроприводов промышленного назначения наиболее информативным показателем надежности является вероятность безотказной работы [11, 12].

Для определения функции вероятности безотказной работы $P(t)$ исследуемых электроприводов воспользуемся наглядным методом анализа блок-схем, который заключается в представлении принципиальной электрической схемы электропривода в виде блоков, соединенных между собой, в зависимости от влияния элементов на работу всей схемы в целом.

В простейшем случае (без каналов резервирования) электропривод можно представить в виде последовательного соединения блоков, характеризующих надежность того или иного элемента схемы, тогда

$$P_{ЭП}(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot P_3(t) \cdot \dots \cdot P_n(t) = \prod_{i=1}^k P_k(t), \tag{1}$$

где k – количество блоков структурной схемы электропривода; $P_k(t)$ – вероятность безотказной работы k -го элемента схемы.

В большинстве случаев, встречающихся на практике, в качестве модели распределения вероятности безотказной работы электропривода используется экспоненциальный закон распределения вероятности [13].

В случае использования экспоненциального закона распределения вероятность безотказной работы $P_k(t)$ элементов электропривода определяется по выражению

$$P_k(t) = e^{-N_i \lambda_{\Sigma} t \prod_{i=1}^n K_i}, \tag{2}$$

где t – текущее значение времени в масштабе заданного параметра; λ_{Σ} – суммарная интенсивность отказов; N_i – число элементов i -го типа; K_i – эксплуатационные коэффициенты; n – число учитываемых факторов.

Для расчета суммарной интенсивности отказов любого блока структурной схемы электропривода пользуются выражением

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda_1(t) + \lambda_2(t) + \dots + \lambda_n(t) = \sum_{i=1}^j \lambda_i, \tag{3}$$

где λ_i – интенсивность отказов элементов i -го типа; j – количество элементов.

Расчет надежности будем проводить относительно структурной (см. рис. 1–3) и принципиальной электрической схем. Пользуясь справочной информацией [14–16], составим таблицу (табл. 1) интенсивности отказов основных элементов схемы и проведем сравнительный расчет вероятности безотказной работы рассмотренных ранее электроприводов (см. рис. 2, 4).

Таблица 1

Интенсивности отказов элементов электропривода

Элементы электронной аппаратуры	Электропривод с векторным управлением (рис. 1)	Электропривод повышенной надежности (рис. 3)	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^{-7}, \text{ч}^{-1}$
1. Регулятор скорости	1	1	3,9
2. Регулятор тока	3	1	3,4
3. Блок выделения модуля	–	1	1,9
4. Блок преобразования координат	1	–	64,1
5. Широтно-импульсный модулятор	3	1	2,5
6. Генератор пилообразных импульсов	1	1	2,45
7. Блок перемножения	–	1	1
8. Логическая схема и гальваническая развязка	1	1	45,1
9. Схема включения датчика тока	3	1	3,5
10. Схема включения датчика скорости	1	1	38,2
11. Преобразователь напряжение/частота	1	–	4,6
12. Схема силового преобразователя	1	1	50,2
13. Схема защиты	1	1	27,1
14. Датчик тока (датчик Холла)	3	1	1
15. Шунтирующий резистор	1	1	2,5
16. Разъемы	9	8	0,03

Рассчитаем интенсивность отказов некоторых элементов схемы ИИУС. Так, например, схема БПК (рис. 2) состоит из 27 резисторов ($\lambda = 0,01 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$), 2 конденсаторов ($\lambda = 0,015 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$), 6 цифровых ($\lambda = 1 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$) и 1 аналоговой микросхемы ($\lambda = 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$), тогда согласно выражению (3) рассчитаем интенсивность отказов БПК.

Аналогично рассчитаем интенсивность отказа каждого блока схемы электропривода (рис. 2, 4) и внесем данные в таблицу (см. табл. 1).

Далее проведем сравнительный расчет вероятности безотказной работы (для 10 000 ч) ИИУС электропривода на основе векторного управления $P_{ВУ}(t)$ и разработанной ИИУС электропривода повышенной надежности $P_{ПН}(t)$.

Сравнение результатов расчетов вероятности безотказной работы рассматриваемых ИИУС электропривода показало, что ликвидация необходимости в трехконтурной системе коррекции тока (применение новой схемы ИИУС) приводит к увеличению надежности, по предварительным расчетам, в 1,086 раза.

Помимо общего повышения надежности к положительным факторам разработанной ИИУС электропривода можно отнести:

- сохранение метрологических и динамических характеристик системы [1, 17];
- снижение общей себестоимости (по предварительной оценке на 18,3 %) и упрощение системы за счет устранения необходимости в изготовлении и наладке, трехконтурной схемы коррекции величины тока.

Заключение

Рассмотрены актуальные направления совершенствования координатных систем лазерных установок за счет повышения надежности ИИУС электропривода. Приведено описание принципа работы ИИУС электропривода на основе векторного управления, ее достоинства и недостатки.

Рассмотрена схема ИИУС электропривода (см. рис. 3), отличающегося повышенными показателями. Проведенный сравнительный расчет надежности показал, что применение новой схемы ИИУС электропривода приводит к увеличению надежности в 1,086 раза и снижению себестоимости на 17 %.

Список литературы

1. Мостовской М. В. Регулируемый электрический привод для лазерных технологических установок: оценка метрологических характеристик методом схемотехнического моделирования // Измерительная техника. 2022. № 2. С. 8–13. doi:10.32446/0368-1025it.2022-2-8-13
2. Патент РФ 2658301. Синхронный линейный электродвигатель / Рогачевский О. А. № 2016135983 ; заявл. 06.09.2016 ; опубл. 20.06.2018.
3. Патент РФ 2658296. Линейный электродвигатель / Рогачевский О. А. № 2016136754 ; заявл. 13.09.2016 ; опубл. 20.06.2018.
4. Вакс Е. Д., Миленский М. Н., Сапрыкин Л. Г. Практика прецизионной лазерной обработки. М. : Техносфера, 2013. 696 с.
5. Москаленко В. В. Системы автоматизированного управления электропривода : учебник. М. : ИНФРА-М, 2007. 208 с.
6. Герман-Галкин С. Г. Многовариантный анализ вентильного электропривода с бесконтактным двигателем постоянного тока // Силовая электроника. 2017. № 4. С. 72–79.
7. Герман-Галкин С. Г., Лебедев В. В., Бормотов А. В. Модульная синхронная индукторная машина в системе электропривода // Механика, автоматика, управление. 2015. Т. 16, № 11. С. 731–737.
8. Овчинников И. Е. Вентильные электрические приводы и двигатели на их основе (курс лекций). СПб. : КОРОНА-Век, 2016. 336 с.
9. Слепцов В. В., Мостовской М. В. Определение технических требований для систем управления электрическим приводом в станках лазерного раскроя металла // Законодательная и прикладная метрология. 2019. № 6. С. 27–29.
10. Патент РФ RU2789839C1. Система управления скоростью вращения вентильного электродвигателя / Слепцов В. В., Мостовской М. В. № 2021137739 ; заявл. 20.12.2021 ; опубл. 13.02.2023, Бюл. № 5.
11. Мостовской М. В., Слепцов В. В., Снедков А. Б. Теоретическая оценка работоспособности регулируемого электропривода координатной системы лазерных установок // Измерительная техника. 2022. № 5. С. 42–49. doi:10.32446/0368-1025it/2022-5-42-49
12. Оськин С. В. Автоматизированный электропривод : учеб. пособие для студентов вузов. Краснодар : КРОН, 2013. 489 с.

13. Кривель С. М. Анализ структурных схем надежности технических систем с использованием SIMULINK // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22, № 6. С. 85–95.
14. Елисеева В. А., Шинянский А. В. Справочник по автоматизированному электроприводу. М. : Энергоатомиздат, 1983. 616 с.
15. Боровиков С. М., Цырельчук И. Н., Троян Ф. Д. Расчет показателей надежности радиоэлектронных средств. Минск : БГУИР, 2010.
16. Анучин А. С. Системы управления электроприводов : учебник для вузов. М. : Изд-во дом МЭИ, 2015. 373 с.
17. Белянин Л. Н. Конструирование печатного узла и печатной платы. Расчет надежности : учеб.-метод. пособие. Томск : Изд-во ТПУ, 2008. 77 с.
18. Билибин К. И., Власов А. И., Журавлева Л. В. [и др.]. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры : учебник для вузов / под общ. ред. В. А. Шахнова. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. 528 с.
19. Слепцов В. В., Мостовской М. В. Методика оценки метрологических характеристик регулируемого электропривода методом схемотехнического моделирования // Законодательная и прикладная метрология. 2021. № 1. С. 22–26.

References

1. Mostovskoy M.V. Adjustable electric drive for laser technological installations: assessment of metrological characteristics by the method of circuit modeling. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring equipment*. 2022;(2):8–13. (In Russ.). doi:10.32446/0368-1025it.2022-2-8-13
2. Patent RU 2658301. *Sinkhronnyy lineynyy elektrodvigatel' = Synchronous linear electric motor*. Rogachevskiy O.A.; No. 2016135983; appl. 06.09.2016; publ. 20.06.2018. (In Russ.)
3. Patent RU 2658296. *Lineynyy elektrodvigatel' = Linear electric motor*. Rogachevskiy O.A.; No. 2016136754; appl. 13.09.2016; publ. 20.06.2018. (In Russ.)
4. Vaks E.D., Milen'kiy M.N., Saprykin L.G. *Praktika pretsizionnoy lazernoy obrabotki = Practice of precision laser processing*. Moscow: Tekhnosfera, 2013:696. (In Russ.)
5. Moskalenko V.V. *Sistemy avtomatizirovannogo upravleniya elektroprivoda: uchebnik = Automated control systems of electric drive : textbook*. Moscow: INFRA-M, 2007:208. (In Russ.)
6. German-Galkin S.G. Multivariate analysis of a valve electric drive with a contactless DC motor. *Silovaya elektronika = Power electronics*. 2017;(4):72–79. (In Russ.)
7. German-Galkin S.G., Lebedev V.V., Bormotov A.V. Modular synchronous inductor machine in an electric drive system. *Mekhanika, avtomatika, upravlenie = Mechanics, automation, control*. 2015;16(11):731–737. (In Russ.)
8. Ovchinnikov I.E. *Ventil'nye elektricheskie privody i dvigateli na ikh osnove (kurs lektsiy) = Valve electric drives and motors based on them (course of lectures)*. Saint Petersburg: KORONA-Vek, 2016:336. (In Russ.)
9. Sleptsov V.V., Mostovskoy M.V. Definition of technical requirements for electric drive control systems in laser metal cutting machines. *Zakonodatel'naya i prikladnaya metrologiya = Legislative and applied metrology*. 2019;(6):27–29. (In Russ.)
10. Patent Russian Federation. *Sistema upravleniya skorost'yu vrashcheniya ventil'nogo elektrodvigatelya RU2789839C1 = Control system for the rotation speed of a valve electric motor RU2789839C1*. Sleptsov V.V., Mostovskoy M.V. No. 2021137739; appl. 20.12.2021; publ. 13.02.2023, bull. № 5. (In Russ.)
11. Mostovskoy M.V., Sleptsov V.V., Snedkov A.B. Theoretical assessment of the operability of an adjustable electric drive of a coordinate system of laser installations. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring equipment*. 2022;(5):42–49. (In Russ.). doi:10.32446/0368-1025it/2022-5-42-49
12. Os'kin S.V. *Avtomatizirovannyy elektroprivod: ucheb. posobie dlya studentov vuzov = Automated electric drive : textbook for university students*. Krasnodar: KRON, 2013:489. (In Russ.)
13. Krivel' S.M. Analysis of structural schemes of reliability of technical systems using SIMULINK. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(6):85–95. (In Russ.)
14. Eliseeva V.A., Shinyanskiy A.V. *Spravochnik po avtomatizirovannomu elektroprivodu = Handbook of automated electric drive*. Moscow: Energoatomizdat, 1983:616. (In Russ.)
15. Borovikov S.M., Tsyrel'chuk I.N., Troyan F.D. *Raschet pokazateley nadezhnosti radioelektronnykh sredstv = Calculation of reliability indicators of electronic means*. Minsk: BGUIR, 2010. (In Russ.)
16. Anuchin A.S. *Sistemy upravleniya elektroprivodov: uchebnik dlya vuzov = Control systems of electric drives : textbook for universities*. Moscow: Izd-vo dom MEI, 2015:373. (In Russ.)
17. Belyanin L.N. *Konstruirovaniye pechatnogo uzla i pechatnoy platy. Raschet nadezhnosti: ucheb.-metod. posobie = Design of a printed circuit unit and a printed circuit board. Reliability calculation : educational and methodical manual*. Tomsk: Izd-vo TPU, 2008:77. (In Russ.)
18. Bilibin K.I., Vlasov A.I., Zhuravleva L.V. et al. *Konstruktorsko-tekhnologicheskoe proektirovaniye elektronnoy apparatury: uchebnik dlya vuzov = Design and technological design of electronic equipment : textbook for universities*. Moscow: Izd-vo MG TU im. N.E. Bauman, 2002:528. (In Russ.)

19. Sleptsov V.V., Mostovskoy M.V. Methodology for assessing the metrological characteristics of a regulated electric drive by the method of circuit modeling. *Zakonodatel'naya i prikladnaya metrologiya = Legislative and applied metrology*. 2021;(1):22–26. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Михаил Владимирович Мостовской

старший преподаватель кафедры приборов
и информационно-измерительных систем,
МИРЭА – Российский технологический университет
(Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, 78)
E-mail: mvmost@yandex.ru

Владимир Владимирович Слепцов

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры приборов
и информационно-измерительных систем,
МИРЭА – Российский технологический университет
(Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, 78)
E-mail: vsleptsov@gmail.com

Наталья Николаевна Куликова

доктор экономических наук, доцент,
профессор кафедры управления инновациями,
МИРЭА – Российский технологический университет
(Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, 78)
E-mail kulikova@mirea.ru

Mikhail V. Mostovskoy

Senior lecturer of the sub-department of instruments
and information and measurement systems,
MIREA – Russian Technological University
(78 Vernadsky avenue, Moscow, Russia)

Vladimir V. Sleptsov

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department of instruments
and information and measurement systems,
MIREA – Russian Technological University
(78 Vernadsky avenue, Moscow, Russia)

Natalia N. Kulikova

Doctor of economical sciences, associate professor,
professor of the sub-department
of innovation management,
MIREA – Russian Technological University
(78 Vernadsky avenue, Moscow, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 15.12.2022

Поступила после рецензирования/Revised 10.11.2023

Принята к публикации/Accepted 15.02.2023