

УДК 520.6.05

© Д. В. Лисин, 2023

СХЕМОТЕХНИКА УЗЛОВ ПРОГРАММИРОВАНИЯ РОССИЙСКИХ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ НА БОРТУ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В статье рассмотрено оригинальное схемотехническое решение, позволяющее реализовать режим программирования в составе собранных устройств современных микроконтроллеров российского производства, применяемых в аппаратуре космического и специального назначения. Данное решение позволяет значительно увеличить возможности разработчика аппаратуры научного и специального назначения, сократить сроки разработки новых устройств и повысить надежность вводимых в эксплуатацию систем, т.к. не содержит механических коммутаторов в цепях питания и программирования микроконтроллера и позволяет производить перепрограммирование системы даже в составе готового штатного изделия, оставляя возможность реализации режима запрета перепрограммирования.

Кл. сл.: перепрограммирование, микроконтроллер, космический эксперимент, серия микроконтроллеров 1886

ВВЕДЕНИЕ

В условиях активного импортозамещения элементной базы научной аппаратуры космического и специального назначения важное значение имеют вопросы организации процесса перепрограммирования бортовых микропроцессорных систем управления. Реалии современного приборостроения таковы, что практически в каждом узле — блоке, плате, датчике — устанавливается цифровая управляющая система, как правило, на базе микроконтроллера. И характеристики функциональности итоговой системы во многом зависят от качества и уровня отработанности управляющих этими микроконтроллерами алгоритмов.

Классический путь реализации режима программирования космических и специальных микропроцессорных узлов — реализация однократно программируемых ПЗУ, как правило, на базе прожигаемых или наращиваемых перемычек. Это дает превосходные результаты по уровню надежности и стойкости к воздействию внешних факторов, однако чрезвычайно усложняет процесс разработки и отладки программного обеспечения, вынуждая разработчиков экспериментальной аппаратуры изготавливать отдельные отладочные платы в перепрограммируемом варианте, а затем, по завершении приемочных испытаний технологических образцов разрабатываемых систем, фактически заново разрабатывать, испытывать и предъявлять заказчику варианты тех же плат с однократно

прошитыми ПЗУ. Помимо удлинения цикла разработки, данный подход чрезвычайно чувствителен к ошибкам, недоработкам и внезапно меняющимся требованиям к итоговой системе в процессе ее разработки, что для экспериментальной аппаратуры совсем не редкость. Любое, даже незначительное изменение одного параметра управляющей программы, не говоря уже об алгоритме, требует проведения повторного цикла испытаний целевой аппаратуры в обоих вариантах — отладочном, на флеш-варианте, и затем штатном, на перепаянных микросхемах однократно программируемого ПЗУ. На практике подобный вариант построения систем приносит значительные риски срыва сроков разработки экспериментальной аппаратуры либо пропуска в сданную систему некачественно отлаженных узлов со всеми вытекающими последствиями.

При использовании доступных пока разработчикам отечественной экспериментальной аппаратуры микроконтроллеров ведущих мировых производителей промышленного исполнения в пластиковых корпусах проблем с перепрограммированием в готовой системе, как правило, не возникает. Однако при создании аппаратуры космического и специального назначения обязательным является применение стойких к воздействию специальных факторов внешней среды микроконтроллеров отечественного производства в металлокерамических корпусах и приемкой уровня "5" и выше. Спектр предложения таких микроконтроллеров достаточно узок, и на режимы их работы,

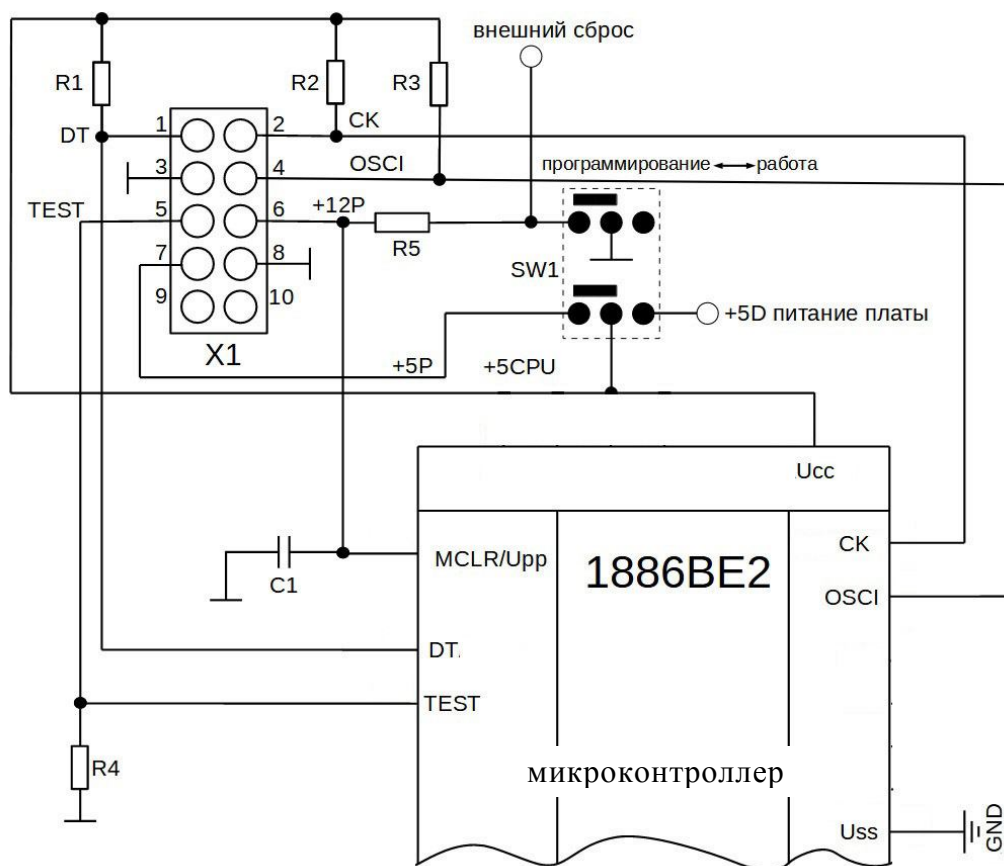


Рис. 1. Рекомендуемая производителем схема включения микроконтроллера серии 1886BE при перепрограммировании [1].

R1–R4: 47 кОм; R5 >10 кОм; C1: 0.1 мкФ; X1: разъем IDC-10 подключения программатора; SW1: двусторонний механический переключатель "программирование – работа". Цепи: DT, CK, OSCI, TEST — цифровые линии программатора; U_{PP} — напряжение программирования микроконтроллера или сигнал сброса (+ 12 В); U_{CC} — напряжение питания микроконтроллера; U_{SS} — "земля"; +5CPU — локальная шина питания микроконтроллера; +5D — шина питания платы; +12P — напряжение программирования флэш-памяти от программатора; +5P — напряжение питания от программатора для питания микроконтроллера в момент программирования

в частности алгоритмы и схемотехнику перепрограммирования встроенных ЭПЗУ, требования по стойкости и надежности накладывают определенные ограничения.

В частности, одна из популярных среди разработчиков аппаратуры специального назначения серий микроконтроллеров 1886 требует наличия механического переключателя в цепях программирования микросхемы (рис. 1, SW1), что делает возможным многократное перепрограммирование в процессе отладки, однако итоговую плату, например, для запуска на космическом аппарате, все равно приходится переделывать на вариант без переключателя в однократно программируемом исполнении.

ОРГАНИЗАЦИЯ РЕЖИМА ПРОГРАММИРОВАНИЯ БЕЗ МЕХАНИЧЕСКОЙ КОММУТАЦИИ

В ходе реализации ряда проектов разработки научной аппаратуры для проведения экспериментов на борту космических аппаратов [2] в ИЗМИРАН была поставлена задача обеспечить применение отечественных микроконтроллеров, включенных в ограничительные перечни разрешенной к применению электронной компонентной базы, при соблюдении следующих требований к процессу разработки целевой аппаратуры:

1. Электронные платы разрабатываются изначально в летном варианте, т.к. времени на по-

вторную разработку и приемку вторых и более вариантов фактические сроки целевого проекта не оставляют.

2. Все узлы разрабатываемых приборов должны иметь возможность перепрограммирования на любой стадии подготовки космического аппарата к запуску вплоть до работ на технической позиции.

3. Требования к надежности функционирования электронных узлов должны быть выполнены на изначально заданном высоком уровне.

Предлагаемый вариант реализации цепей программирования микроконтроллера, удовлетворяющий требованиям производителя и одновременно не содержащий ни механических коммутаторов, об-

ладающих низкой надежностью, ни оптронов, имеющих, как правило, проблемы со стойкостью к воздействию специальных факторов, приведен на рис. 2. Схема показана на примере популярного 8-битного микроконтроллера 1886BE2 (ср. с рис. 1) в варианте использования с флэш-ПЗУ.

Программатор для микроконтроллеров серии 1886BE подключается к соединителю X1, в нашем варианте штатный IDC-10 с плоским шлейфом, возможен выбор любого более компактного соединителя. Цоколевка соединителя на схеме соответствует цоколевке оригинального программатора производства разработчика данной серии микросхем зеленоградского предприятия "МИЛАНДР" (рис. 1). Программирование производится при выключенном питании платы по шине +5D (рис. 1).

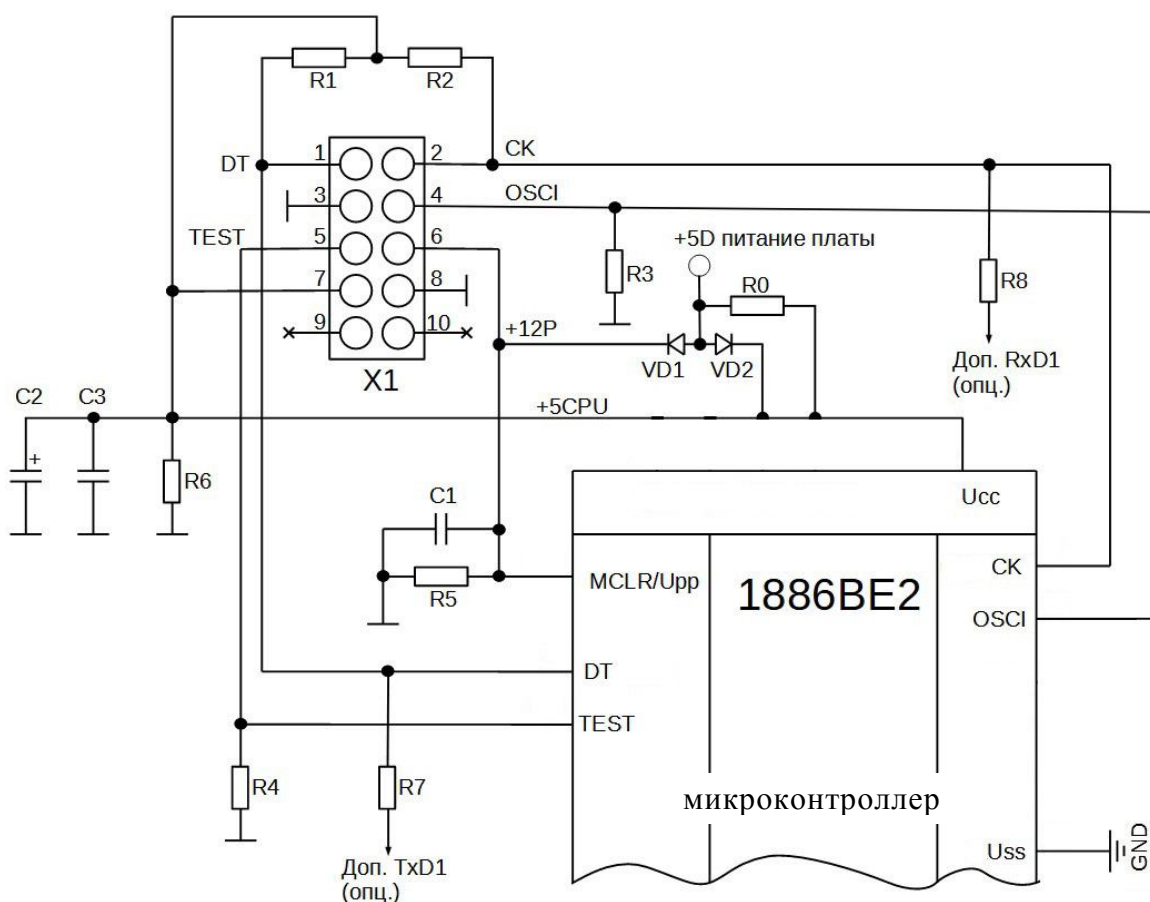


Рис. 2. Универсальная схема реализации цепей программирования без механического переключателя. R1–R6: 47 кОм; C1, C3: 0.1 мкФ; C2: 22 мкФ; VD1, VD2: диоды Шоттки; R0 — опциональная напавляемая перемычка (штатно не устанавливается); R7, R8 — опциональные резисторы 1 кОм (при необходимости использования порта программатора); Tx/D1, Rx/D1 — линии дополнительного последовательного порта для использования на плате.

Обозначения цепей и сигналов те же, что на рис. 1

В процессе программирования питание микроконтроллера, вместо штатной шины +5P (рис. 1), производится от программатора, который подает на схему два напряжения: +5 В основного питания на контакт 7 (шина +5CPU) и +12 В питания для прожига флэш-ячеек на контакт 6 (шина +12P) (рис. 2). Это питание не должно попадать на всю оставшуюся часть платы, т.к. нагрузочная способность программатора очень мала, поэтому для развязки в этом режиме в схеме установлены диоды VD1 и VD2. Это может быть любая пара подходящих по нагрузкам диодов Шоттки как в составе микросборки, так и в отдельных корпусах. Главное требование к этим диодам — минимальное прямое падение напряжения, не превышающее 0.4 В, т.к. оно вычитается из напряжения питания микроконтроллера от шины питания платы +5D.

Показанный на схеме резистор R0 — опциональная перемычка, которая в процессе отладки системы не устанавливается. Если разработчиком аппаратуры принимается решение о том, что в штатном варианте эксплуатации питание микроконтроллера через диод VD2 недопустимо (по соображениям снижения напряжения питания, снижения надежности и т.п.), то установка данной перемычки позволяет исключить влияние диода на цепи питания микроконтроллера. Ценой этого решения будет утрата возможности дальнейшего перепрограммирования устройства через соединитель X1 (программатор, не выдержав нагрузки всей платы, скорее всего, откажется работать), однако и в этом случае всегда существует возможность относительно несложного демонтажа данной перемычки в случае крайней необходимости и восстановления таким образом возможности перепрограммирования узла.

На контакты 1 и 2 соединителя X1 программатор подает сигналы цифровой шины, по которой происходит обмен с ядром микроконтроллера. Эти линии подтянуты резисторами 47 кОм к питанию программатора, как это требуется в соответствии с рекомендациями завода-изготовителя. На микросхеме 1886BE2 эти линии подключены к выводам СК, DT последовательного интерфейса № 1 микросхемы. Чтобы использовать этот интерфейс в системе, достаточно подключить местного абонента к этим линиям через резисторы R7, R8 порядка 1 кОм — этого будет вполне достаточно, чтобы не мешать работе программатора и не перегружать линии связи при его отсутствии. При этом в микросхеме остаются доступными оба имеющихся порта интерфейса RS-232.

Таким образом, локальная цепь питания микроконтроллера в режиме программирования питается от внешнего программатора и изолируется от остальной платы диодом VD2. При этом дополнительное напряжение прожига ячеек +12 В по-

ступает также от программатора непосредственно на многофункциональный вывод MCLR/Upp. При необходимости на этой цепи может быть реализована цепь внешнего сброса. В наших вариантах применения нажимать кнопку сброса было некому, поэтому использовались исключительно штатные схемы сброса микроконтроллера, который имеет их несколько (при снижении питания и по сторожевому таймеру).

Диод VD1 выполняет две функции — не пропускает напряжение программирования +12 В на шину питания платы +5D и подтягивает к уровню +5 В цепь сброса микроконтроллера на выводе MCLR/Upp в нормальном режиме работы устройства.

Резистор R3 служит исключительно для целей подтяжки потенциала линии OSCI при отключенном программаторе, поэтому направление его подключения не критично. В нашем случае эту цепь было удобнее подключить к потенциалу "земли". Конденсаторы C2 и C3 — стандартный набор фильтрации помех по локальной шине питания микроконтроллера. Резистор R6 обязательно необходим, т.к. при снятии питания платы локальная цепь +5CPU будет длительное время оставаться под напряжением питания до разряда этих конденсаторов вследствие наличия диода VD2. Это будет составлять заметное время, в течение которого микроконтроллер будет продолжать работать при выключенной плате.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Основное достоинство предлагаемой схемы — возможность перепрограммирования целевого устройства на любой стадии разработки системы без существенного снижения надежности. Некоторым недостатком является тот факт, что микроконтроллер в штатном режиме питается через диод VD2, что приводит к снижению напряжения его питания, нижним пределом которого является уровень +4.5 В. При использовании диода Шоттки несложно получить несколько более высокий уровень и формально уложиться в спецификации производителя по напряжению питания (наши типичные результаты — 4.75 В), однако все равно мы получаем некоторое уменьшение запаса устойчивости системы в случае деградации источника питания и самой микросхемы. Если это будет признано нежелательным, схема предоставляет возможность исключить диод VD2 установкой либо механической, либо напаиваемой перемычки R0. Возможность перепрограммирования при этом потеряется, однако снятие перемычки восстановит ее.

Область применения данного схемного решения — разработка экспериментальных образцов

научной и специальной аппаратуры повышенной надежности преимущественно космического назначения в условиях предельно сжатых сроков введения систем в штатную эксплуатацию. Предложенная схема была согласована с предприятием-изготовителем программаторов для серии 1886 и отлично зарекомендовала себя в течение нескольких лет использования в проектах различного назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рекомендации по программированию памяти программ микроконтроллеров серии 1886BE. Изд. ЗАО "ПКК Миландр". URL: <https://support.milandr.ru/upload/iblock/583/5837014a7b26db8f0acbbb6973efcf7a.pdf>
2. Кузнецов В.Д., Лисин Д.В. Возможности использования наземного комплекса управления и приема телеметрической информации ИЗМИРАН для организации дублирующих каналов связи со спутниками геофизического мониторинга Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли

из космоса. 2010. Т. 7, № 4. С. 232–234.
URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15579465>

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН), Москва, Троицк

Контакты: Лисин Дмитрий Валерьевич,
lisindv@izmiran.ru

Материал поступил в редакцию 25.01.2023

CIRCUITRY OF MICROCONTROLLER PROGRAMMING NODES FOR USE IN SPACE EXPERIMENTS

D. V. Lisin

*Pushkov Institute of terrestrial magnetism, ionosphere and radio wave propagation (IZMIRAN),
Troitsk, Moscow, Russia*

The article considers an original circuit design solution that allows implementing the programming mode of modern Russian-made microcontrollers used in space and special-purpose equipment as part of the assembled device. Due to the absence of mechanical switches in the power supply and microcontroller programming circuits and the ability to reprogram the system even as part of a finished standard product, this solution significantly increases the capabilities of the developer of scientific and special-purpose equipment, speeds up the development of new devices, and increases the reliability of systems being put into operation.

Keywords: reprogramming, microcontroller, space experiment

INTRODUCTION

The issues of organizing the process of reprogramming onboard microprocessor control systems are critical in the context of active import substitution of the element base of scientific equipment for space and special purposes. The realities of modern instrumentation are such that in almost every node — a block, a board, a sensor — a digital control system is installed, usually based on a microcontroller. And the characteristics of the functionality of the final system largely depend on the quality and level of sophistication of the algorithms that control these microcontrollers.

The classic way to implement the programming mode of space and special microprocessor nodes is the implementation of once-programmable ROMs, as a rule, based on fuses and antifuses. This gives excellent results in terms of reliability and resistance to external factors, however, it extremely complicates the process of developing and debugging software, forcing developers of experimental equipment to manufacture separate debug boards in a reprogrammable version and then, after completion of acceptance tests of technological samples of the developed systems, to actually re-develop, test, and present to the customer versions of the same boards with a read-only ROM. In addition to the elongation of the development cycle, this approach is extremely sensitive to errors, shortcomings, and suddenly changing requirements for the final system during its development, which is not uncommon for experimental equipment. Any, even insignificant, change in one parameter of the control program, not to mention the algorithm, requires a test recycle of the target equipment both in debugging mode, with the use of a flash device, and then in standard mode, on

re-soldered microcircuits of a read-only ROM. In practice, such a variant of building systems introduces significant risks of failure to meet the deadlines for the development of experimental equipment, or skipping poorly debugged nodes into the delivered system, with all the ensuing consequences.

When using the industrial microcontrollers in plastic cases, produced by the world's leading manufacturers and available to developers of domestic experimental equipment, problems with the finished system reprogramming, as a rule, do not arise. However, when creating equipment for space and special purposes, it is mandatory to use microcontrollers of domestic production that are resistant to the effects of special environmental factors, produced in metal-ceramic cases, and have an acceptance level of 5 or higher. The range of offerings of such microcontrollers is quite narrow, and the requirements for durability and reliability impose certain restrictions on their operating modes, in particular on the algorithms and circuitry for reprogramming embedded EEPROMs.

Fig. 1. The scheme recommended by the manufacturer for switching on the microcontroller of the 1886BE series during reprogramming [1].

R1–R4: 47 k Ω ; R5 > 10 k Ω ; S1: 0.1 μ F; X1: connector IDC-10 to connect the programmer; SW1: dual mechanical switch *programming-work*. Circuits: DT, CK, OSC1, TEST — digital lines of the programmer; U_{pp} — voltage of microcontroller programming or reset signal (+ 12 V); U_{cc} — microcontroller power supply voltage; U_{ss} — "ground"; + 5CPU — local microcontroller power bus; + 5D — board power bus; + 12P — voltage of flash memory programming from the programmer; + 5P — power supply voltage from the programmer to power the microcontroller at the time of programming

In particular, one of the series of microcontrollers (1886), which is popular among developers of special-purpose equipment, requires a mechanical switch in the programming microcircuits (Fig. 1, SW1). It allows for multiple reprogramming during debugging, however, the final board, for example, for use on a spacecraft, must be altered to remove a switch in a read-only design.

ARRANGEMENT OF THE PROGRAMMING MODE WITHOUT MECHANICAL COMMUTATION

During the development of scientific equipment for conducting experiments on board spacecraft [2], IZ-MIRAN set the task of ensuring the use of domestic microcontrollers included in the lists of electronic component base allowed for use, subject to the following requirements for the development of target equipment.

1. Electronic boards are developed from the beginning in the flight version, because the actual target project timeline is very tight and there is no time to re-engineer and accept subsequent versions.

2. All nodes of the developed devices must be able to be reprogrammed at any stage of preparing the spacecraft for launch, up to and including operations at the test site.

3. The requirements for the reliability of electronic component operations must be met at the initially set high level.

The proposed implementation of the microcontroller programming circuits, which meets the requirements of the manufacturer and at the same time does not contain either mechanical switches with low reliability or optocouplers, which, as a rule, have problems with resistance to special factors, is shown in Fig. 2. The circuit is shown using the popular 8-bit 1886BE2 microcontroller (compare with Fig. 1) and a flash ROM.

Fig. 2. Universal scheme for programming circuits without a mechanical switch.

R1–R6: 47 k Ω ; C1, C3: 0.1 μ F; C2: 22 μ F; VD1, VD2: Schottky diodes; R0 — optional soldered jumper (not installed as standard); R7, R8 — optional resistors 1 k Ω (if the use of the programmer port is necessary); TxD1, RxD1 — additional serial port lines for use on the board.

The designations of circuits and signals are the same as in Fig. 1

The programmer for microcontrollers of the 1886BE series is connected to connector X1, in our case, it is a regular IDC-10 with a flat ribbon cable, but one can choose any more compact connector. The pinout of the connector on the circuit corresponds to

the pinout of the original programmer produced by MILANDR — the Zelenograd-based developer of this series of microcircuits (Fig. 1). Programming is performed with the board powered off via the +5D bus (Fig. 1).

During programming, the microcontroller is powered from a programmer (instead of the standard +5P bus, Fig. 1), which supplies two voltages to the circuit: +5 V of the main power supply to pin 7 (bus +5CPU) and +12 V of power supply to burn flash cells to pin 6 (bus +12P) (Fig. 2). This supply should not fall on the rest of the board, because the load capacity of the programmer is very small, therefore, for decoupling in this mode, diodes VD1 and VD2 are installed in the circuit. These can be any pair of loadable Schottky diodes in both the microassembly and the individual housings. The main requirement for these diodes is a minimum direct voltage drop, not exceeding 0.4 V since it is subtracted from the microcontroller power voltage from the +5D board power bus.

Resistor R0 shown in the circuit is an optional jumper, that is not installed during system debugging. If the equipment developer decides that the power supply of the microcontroller through the diode VD2 in the normal operation version is unacceptable (for reasons of reducing the supply voltage, reliability, etc.), then the installation of this jumper allows to exclude the influence of the diode on the microcontroller power supply circuit. The cost of this solution will be the loss of the possibility of further reprogramming the device through the X1 connector (the programmer, unable to withstand the load of the entire board, most likely refuses to work), however, in this case, it is always possible to relatively easily remove this jumper in case of emergency, thereby restoring the ability to reprogram the node.

On pins 1 and 2 of connector X1, the programmer sends digital bus signals, through which the exchange with the microcontroller core takes place. These lines are pulled up with 47 k Ω resistors to the power supply of the programmer, as required in accordance with the manufacturer's recommendations. On the 1886BE2 microcircuit, these lines are connected to the CK, DT pins of serial interface No. 1 of the circuit. To use this interface in the system, it is enough to connect a local recipient to these lines through resistors R7, R8 of the order of 1 k Ω : this will be quite enough not to interfere with the programmer operation and not to overload the communication lines in its absence. At the same time, both available ports of the RS-232 interface remain available in the microcircuit.

Thus, the local power supply circuit of the microcontroller in programming mode is powered by an external programmer and isolated from the rest of the board by the VD2 diode. An additional +12 V cell burning voltage is also supplied from the programmer

directly to the MCLR/ U_{PP} multifunction output. If necessary, this circuit can be implemented as an external reset circuit. In our applications, there was no one to press the reset button, so we used only the standard reset circuits of the microcontroller, which has several of them (when the power is reduced and by the watchdog timer).

Diode VD1 performs two functions — it does not pass the +12 V programming voltage to the +5D board power bus and pulls up the microcontroller reset circuit to +5 V at the MCLR/ U_{PP} output in the normal operation mode of the device.

Resistor R3 serves solely for the purpose of pulling up the potential of the OSCI line when the programmer is turned off, so the direction of its connection is not critical. In our case, it was more convenient to connect this circuit to the "ground" potential. Capacitors C2 and C3 are a standard set of noise filters on the microcontroller's local power bus. Resistor R6 is required, because, when the board is powered off, the +5CPU local circuit will remain energized for a long time until these capacitors are discharged due to the presence of the VD2 diode. This will be a noticeable amount of time during which the microcontroller will continue to work with the board turned off.

DISCUSSION AND CONCLUSIONS

The main advantage of the proposed scheme is the possibility of reprogramming the target device at any stage of system development without a significant decrease in reliability. Some disadvantage is that the microcontroller is normally powered through the VD2 diode, which leads to a decrease in its supply voltage, the lower limit of which is +4.5 V. When using a Schottky diode, it is easy to get a slightly higher level and formally meet the manufacturer's specifications for supply voltage (our typical results are 4.75 V),

however, we still get some decrease in the system stability margin in case of degradation of the power supply and the microcircuit itself. If this is deemed undesirable, the circuit provides the ability to exclude the VD2 diode by installing either a mechanical or soldered jumper R0. The possibility of reprogramming will be lost, however, removing the jumper will restore it.

The scope of this circuit solution is the development of experimental samples of scientific and special equipment of increased reliability, mainly for space purposes, in conditions of extremely short deadlines for introducing systems into regular operation. The proposed scheme was agreed upon with the manufacturer of programmers for the 1886 series and proved to be excellent for several years of use in projects of various purposes.

REFERENCES

1. *Rekomendazii po programmirovaniyu pamyati pro-gramm mikrokontrollerov serii 1886BE*. Izd. ZAO "PKK Milandr" [Recommendations for programming the memory of programs of microcontrollers of the 1886BE series. PKK Milandr, Inc.]. URL: <https://support.milandr.ru/upload/iblock/583/5837014a7b26db8f0acbbb6973efcf7a.pdf> (In Russ.).
2. Kuznetsov V.D., Lisin D.V. [Possibilities of using the ground-based control complex and receiving telemetry information from IZMIRAN for the organization of duplicate communication channels with satellites of geophysical monitoring of the Earth]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space], 2010, vol. 7, no. 4, pp. 232–234. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15579465>

Contacts: *Lisin Dmitriy Valer'evich*,
lisindv@izmiran.ru

Article received by the editorial office on 25.01.2023