

УДК 681.51

Фабрицкая М.С.

студент

Научный руководитель: Пугачёв А.А., к.т.н, доцент

Санкт-Петербургский горный университет

**РАЗРАБОТКА МИКРОПРОЦЕССОРНОГО КОНТРОЛЛЕРА ДЛЯ
УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКОЙ**

Сформулированы функциональные и технические требования к контроллеру для управления дизельным, газопоршневым и бензиновым электроагрегатами, описана основная компонентная база аппаратной части контроллера, сформулированы требования к программному обеспечению контроллера, описана реализация возможности удалённого мониторинга на базе сенсорной панели оператора.

Ключевые слова: контроллер управления, двигатель-генераторная установка, автоматизация, распределённая генерация, малая энергетика.

Fabritskaya M.S.

student

Scientific adviser: Dr. Pugachev A.A., associate professor

St. Petersburg Mining University

**DEVELOPMENT OF A MICROPROCESSOR CONTROLLER TO
CONTROL THE ENGINE-GENERATOR SET**

The functional and technical requirements for the controller for controlling diesel, gas piston and gasoline electric units are formulated, the main component base of the controller hardware is described, the requirements for the controller software are formulated, and the implementation of the remote monitoring capability based on the operator's touch panel is described.

Key words: control controller, engine-generator set, automation, distributed generation, small power generation.

Тенденция к развитию распределённой генерации в России в последние годы стремительно растёт, что требует обеспечения как технического обоснования внедрения новых децентрализованных мощностей, так и их надёжного и безопасного функционирования с учётом особенностей эксплуатации. Объектами распределённой генерации являются генерирующие установки на базе газопоршневого, бензинового или дизельного двигателей, которые применяют как в качестве основных (автономных) источников энергоснабжения, так и в качестве резервных источников питания в режиме интеграции с централизованной сетью. Развитие и эксплуатация объектов распределённой генерации требует решения ряда серьезных технико-экономических задач, одной из которых является автоматизация и управление электроагрегатом. При этом выбранное техническое решение должно обеспечивать высокую эффективность, экономичность, простоту управления, бесперебойность работы и быстродействие [1].

Система регулирования и контроля является одной из множества систем, входящих в состав генераторной установки, и выполняет важную функцию – управляет электроагрегатом и контролирует основные параметры, обеспечивая надёжную и безопасную работу установки. Система регулирования и контроля включает в себя микропроцессорный контроллер, датчики и измерительные приборы, в отдельных случаях – систем удалённого мониторинга двигатель-генераторной установкой. Микропроцессорный контроллер является основой системы, именно посредством него осуществляется обработка считываемых входных параметров с датчиков и выдача выходных сигналов на управление. Система управления и контроля позволяет оптимизировать работу установки, следить за ее состоянием и производительностью, а также быстро реагировать на любые отклонения и аварийные ситуации.

На сегодняшний день на российском рынке предложено немало контроллеров, однако все они преимущественно зарубежного производства. Наиболее популярные из марок – Deep Sea Electronics (Великобритания), CRE Technology (Франция), ComAp (Чехия), Smartgen (Китай), Lovato (Италия), DEIF (Дания). Упомянутые производители предлагают модели различного функционала – от простейших контроллеров ручного запуска электроагрегата до контроллеров параллельной работы, позволяющих синхронизировать группу электроагрегатов и распределить нагрузку между ними.

«Начинкой» контроллера, помимо аппаратной части, является программное обеспечение, позволяющее производить конфигурацию уставок и выбор параметров для работы с конкретной установкой и конкретными датчиками. Поэтому немаловажным фактором является как корректная работа программного обеспечения, вшитого в плату контроллера, так и возможность работы с ним с помощью персонального компьютера. При эксплуатации зарубежных контроллеров это стало проблемой в связи с санкциями зарубежных производителей, блокировкой аккаунтов российских пользователей, отмены технической поддержки работы оборудования. Помимо прочего, рынок контроллеров претерпел изменения, связанные с повышением цен – стоимость импортного оборудования возросла на 30-50% за последний год, это обусловлено как увеличением отпускной стоимости от производителей, так и трудностями логистики. Всё это обуславливает необходимость в разработке и последующим внедрении контроллера российского производства с полностью русифицированным программным обеспечением и хранением информации на серверах, непосредственно находящихся на территории Российской Федерации.

Изучив функциональные и технические параметры контроллеров, эксплуатирующихся российскими организациями и имеющих широкое

применение на объектах распределённой генерации, а также российские и иностранные патенты на разработки по теме автоматизации генераторных установок [2-6] были сформированы следующие требования, предъявляемые к микропроцессорному контроллеру для управления одной двигатель-генераторной установкой отечественного производства.

1. Назначение контроллера – управление двигатель-генераторной установкой любого типа электроагрегата в качестве основного, резервного и аварийного источника питания.

2. Функциональные требования:

1) ручной запуск и останов электроагрегата;
2) автоматический запуск и останов электроагрегата; 3) контроль параметров электросети;

4) управление переключателем автоматического ввода резерва (АВР);

5) мониторинг и контроль параметров работы электроагрегата с их индикацией;

5) мониторинг состояния зарядного генератора и АКБ;

6) регистрация в памяти устройства и на внешней флеш-карте формата SD измеренных параметров и событий;

7) защита от перегрузок, коротких замыканий и других аварийных ситуаций;

8) возможность удалённого мониторинга и управления через интерфейс Ethernet или RS-485;

9) возможность конфигурирования параметров в программном обеспечении через интерфейс USB 2.0.

Контроллер должен осуществлять мониторинг и измерение следующих основных параметров ДГУ:

1) генератора – 3-х фазное напряжение, ток, частота, симметрия и последовательность фаз;

2) промышленной сети – 3-х фазное напряжение, частота и последовательность фаз;

3) двигателя – аналоговые и дискретные измерения давления масла, температуры охлаждающей жидкости, уровня топлива и прочие показатели, определяемые пользователем;

4) зарядного генератора – выходное напряжение;

5) аккумуляторной батареи – выходное напряжение.

2. Технические требования.

Питание контроллера - 8-35 В постоянного тока, от аккумуляторной батареи. В случае необходимости подзарядки АКБ должен быть предусмотрен зарядный генератор в составе электроагрегата или щит управления, дооснащенный зарядным устройством с питанием от сети (в случае наличия таковой). Период сохранения работоспособности при падении напр. пит. до 0 В до 50 мс.

Ток потребления: в режиме ожидания 100 мА при 12 В, 50 мА при 24 В в режиме работы 200 мА при 12 В, 150 мА при 24 В.

Допустимый ток на выходах: 2 А постоянного тока при напряжении питания.

Диапазон рабочих температур: от -20°C до +60°C.

Диапазон температур хранения: от -40°C до +60°C.

Коммуникационные порты: RS485 x 2, Ethernet, USB 2.0.

Контроллер должен иметь слот SD флэш-карты. Контроллер должен иметь 4 аналоговых входа, 4 дискретных входов и 8 дискретных выходов.

4. Требования к надежности. Контроллер должен обеспечивать надежную защиту от перегрузок выходных каналов, коротких замыканий и других аварийных ситуаций. Контроллер должен иметь высокую степень защиты от воздействия внешних факторов (вибрации, влаги, пыли) - степень защиты: IP65.

5. Требования к программному обеспечению. Программное обеспечение должно быть надежным и стабильным. Программное обеспечение должно иметь интуитивно понятный русскоязычный интерфейс для удобного управления и мониторинга работы ДГУ.

6. Требования к совместимости: контроллер должен работать с бензиновым, дизельным, газопоршневым и силовым типами электроагрегата.

7. Требования к конструкции: контроллер должен состоять из корпуса и крышки, которые изготовлены из металла. Крышка крепится к корпусу четырьмя винтами. На боковых стенках корпуса должны находиться прямоугольные отверстия для крепления контроллера к плоской поверхности (крышка шкафа управления ДГУ) с помощью монтажного комплекта. Внутри корпуса должна быть расположена монтажная плата с микропроцессором, ЖК индикатором, разъемами, кнопками и прочими электронными компонентами, необходимыми для работы устройства. Лицевая панель должна быть выполнена из специального полимера с нанесенной текстово-графической информацией. LED и ЖК индикация читается через прозрачные окна в пластике. В местах нахождения кнопок специальным теснением в пластике сделаны «мембраны», под которыми расположены толкатели кнопок, смонтированных на монтажной плате. Такое решение продиктовано требованиями повышения надежности (исключения шлейфов и разъемов), упрощения сборки и экономической целесообразностью.

8. Требования к органам управления и индикации: на лицевой панели контроллера должны располагаться три кнопки управления ПУСК, АВТО, СТОП и две кнопки для навигации меню и выбора параметров (кнопка со стрелкой, направленной вверх и кнопка со стрелкой, направленной вниз). Пятикнопочная клавиатура контроллера должна обеспечивать ручное управление электроагрегатом, навигацию по меню ЖКИ, квитирование

аварий, выбор режима работы станции, параметрирование основных настраиваемых уставок. Для отображения контролируемых параметров на лицевой панели контроллера имеется графический монохромный ЖКИ с русскоязычным интерфейсом и три светодиодных индикатора.

9. Требования к разъёмам контроллера представлены в таблице 1.

Таблица 1

Разъёмы контроллера

| Номер контакта | Обозначение контакта(ов) | Назначение контакта(ов) | Примечание |
|----------------|--------------------------|------------------------------------|---|
| 1 | J | свободно программируемые | дискретные выходы |
| 2 | I | | |
| 3 | H | | |
| 4 | G | | |
| 5 | ground | заземление | |
| 6 | V- | питание контроллера | От 8 до 35 В постоянного тока, соблюдая полярность |
| 7 | V+ | | |
| 8 | A | управление стартером | дискретный выход |
| 9 | B | управление топливным клапаном | дискретный выход |
| 10 | заряд. ген. | вход контроля зарядного генератора | |
| 11 | C | свободно программируемые | дискретные выходы |
| 12 | D | | |
| 13 | E | | |
| 14 | F | | |
| 15 | общий | - | аналоговый вход |

Продолжение табл. 1

| | | | |
|----|---|--|------------------|
| 16 | - | подключение датчика давления масла | аналоговый вход |
| 17 | - | подключение датчика температуры охлаждающей жидкости | аналоговый вход |
| 18 | - | подключение датчика уровня топлива | аналоговый вход |
| 19 | A | свободно программируемые | дискретные входы |
| 20 | B | | |
| 21 | C | | |
| 22 | D | | |

| | | | |
|----|-------|--|---|
| 24 | L1 | измерительный вход напряжения фазы L1 | измерение напряжений генератора |
| 25 | L2 | измерительный вход напряжения фазы L2 | |
| 26 | L3 | измерительный вход напряжения фазы L3 | |
| 27 | N | вход подключения нейтрали | |
| 28 | L1 | измерительный вход напряжения фазы L1 | измерение напряжений сети |
| 29 | L2 | измерительный вход напряжения фазы L2 | |
| 30 | L3 | измерительный вход напряжения фазы L3 | |
| 31 | N | вход подключения нейтрали | |
| 32 | L1 | измерительный вход силы тока фазы L1 | измерение силы токов, выдаваемых генератором в нагрузку (от трансформаторов тока ДГУ) |
| 33 | L2 | измерительный вход силы тока фазы L2 | |
| 34 | L3 | измерительный вход силы тока фазы L3 | |
| 35 | N | вход подключения нейтрали | |
| 36 | экран | подключение магнитного датчика контроля скорости | MPU (датчик Холла) |
| 37 | - | | |
| 38 | + | | |
| 39 | экран | коммуникационный порт RS-485 | |
| 40 | B | | |
| 41 | A | | |

Исходя из сформулированных требований, для работы контроллера с двигатель-генераторной установкой будут использоваться несколько датчиков, обеспечивающих измерение основных параметров, таких как уровень топлива в топливном баке, температура охлаждающей жидкости, давление масла в двигателе, а также датчик Холла (магнитный датчик оборотов двигателя). Эти датчики подключаются к аналоговым входам контроллера, так как необходимо получить аналоговый сигнал, т.е. значение

измеряемого параметра. Аналоговый вход контроллера — это вход, на который можно подавать аналоговый сигнал, то есть определённый вывод на корпусе, к которому можно подключить датчик, на выходе которого имеется аналоговый сигнал. Так как контроллер работает только с цифровыми сигналами, преобразование полученных с датчиков аналоговых сигналов осуществляется с помощью АЦП (аналого-цифрового преобразователя) в составе устройства.

Для предотвращения перегрева двигателя ДГУ используется охлаждающая жидкость, контроль за которой осуществляется с помощью резистивного датчика температуры охлаждающей жидкости (ДТОЖ). Данный датчик основан на работе термистора, который изменяет свое омическое сопротивление в зависимости от температуры, т.е. математическая модель такого датчика может быть выражена кривой зависимости изменения температуры от сопротивления. Конструкция такого датчика довольно проста, а стоимость экономична.

Наиболее распространенный и часто применяемый датчик уровня топлива (ДУТ) – потенциометрический поплавкового типа. Он также прост в конструкции и экономичен. Поплавок соединен с переменным резистором (иначе говоря, “потенциометром”). При изменении уровня топлива в баке изменяется и положение поплавка (рис. 20). Поплавок связан с потенциометром, так что меняется сопротивление резистора и, следовательно, изменяется выходящее с датчика напряжение. Данные поплавкового датчика передаются на приборную панель через отдельный провод в виде аналогового сигнала (напряжение).

Датчик давления масла представляет из себя переменный резистор, сопротивление которого зависит от силы, приложенной к чувствительному элементу, следовательно, можно косвенно оценить силу нажатия или вес воздействующего на датчик объекта. Благодаря своей простоте, стойкости к износу и невысокой стоимости, резистивные датчики получили широкое

применение. Конструктивно датчик состоит из двух слоёв, разделённых между собой изоляционной прокладкой специальной формы. Верхний слой представляет из себя плёнку со встречно напечатанными проводниками – тот самый чувствительный элемент, на который необходимо воздействовать путём нажатия. Нижний слой выполнен в виде подложки с печатным полупроводником. Следовательно, чем больше будет оказываться давление на чувствительный элемент, тем больший процент печатных проводников начнёт взаимодействовать с полупроводниковой подложкой. Всё это приведёт к последовательному уменьшению сопротивления резистивного датчика.

Электромагнитный датчик (MPU - Magnetic PickUp) измеряет скорость вращения двигателя. Он устанавливается с требуемым воздушным зазором на зубчатое колесо маховика двигателя. Частота снимаемых с датчика сигналов будет пропорциональна частоте вращения двигателя. Более знакомое название данного датчика – датчик Холла. В аналоговых датчиках напряжение Холла (напряжение на гранях А и С) будет зависеть от напряженности магнитного поля. Или простыми словами, чем ближе мы поднесем магнит к датчику, тем больше будет напряжение Холла. Это и есть прямолинейная зависимость. Импульсные сигналы от датчика скорости поступают на клеммы контроллера, который пересчитывает их и преобразует в числовые значения.

Элементная база контроллера – это его компоненты, составляющие основу разрабатываемого устройства. В основе контроллера ДГУ лежит 32-х разрядный АРМ микроконтроллер STM32F. Это высокопроизводительный процессор с ядром Cortex M3, способный работать на частоте до 120 МГц и имеющий на борту 1 Мб флэш-памяти и 512 Кб оперативной памяти. Запас производительности данного процессора позволяет наращивать функционал контроллера ДГУ без изменения аппаратной части, а лишь обновлением его программной части. Для индикации режимов работы ДГУ,

измеряемых параметров, аварийных и предупредительных сообщений, а также параметрирования с лицевой панели используется ЖК экран размером 72 x 40 мм и разрешением 128 x 64. Такое разрешение позволяет выводить данные в четыре хорошо читаемые строки. Индикатор имеет LED подсветку с настройкой яркости. Для повышения точности измерения уровней напряжения, тока и частоты, а так же временных интервалов в схеме применены отдельные микросхемы аналогово-цифровых преобразователей и таймера. Помимо повышений точности измерений это позволило дополнительно разгрузить центральный процессор. Для организации порта Ethernet использован трансивер LAN8742A-CZ, что также высвободило значительную часть ресурсов процессора и увеличило надёжность соединения по LAN. Управляющие сигналы контроллера ДГУ усиливаются 2-х канальными драйверами с выходами типа N-канал. Это современное решение позволяет коммутировать значительные токи с высокой скоростью и защитой от перегрузки, что в некоторых случаях позволяет обойтись без использования промежуточных электромагнитных реле в цепях управления исполнительными механизмами электростанции [7]. Номинальные параметры интерфейсов RS485 обеспечивают микросхемы. Учитывая специфические режимы питания контроллера ДГУ, когда напряжение постоянного тока может варьироваться в пределах от 8 до 35В, а в режимах запуска электроагрегата кратковременно опускаться до 5 или даже 0 В, в схеме был собран DC-DC преобразователь на аналоговых компонентах и конденсаторный буфер. Помимо стабильности питания такой преобразователь должен выдерживать пиковые скачки напряжения до 60 В от зарядного генератора и обеспечивать переход контроллера ДГУ в «спящий» режим для экономии электроэнергии в отсутствии активности.

Помимо вышеуказанного, для сборки электронной платы были использованы качественные SMD компоненты коммерческого класса. Для монтажа в шкафу управления предусмотрены быстроразъемные клеммные

колодки с винтовой фиксацией проводов. Все электронные компоненты смонтированы на одной печатной плате, что выгодно сказалось на надёжности конструкции (отсутствие лишних шлейфов/разъемов), простоте сборки и цене изделия. Такое решение является общепризнанным и стало возможным благодаря многослойной конструкции текстолитовой платы. Электронная «начинка» помещена в высокопрочный металлический порошковой окраски корпус с винтовым креплением. Применение стали для создания корпуса дополнительно защищает электронную схему от электрических и магнитных полей, создаваемых силовыми генераторами. Все разъемы и крепежные элементы размещены на задней крышке контроллера ДГУ, что делает лицевую часть защищенной от пыли и влаги. Для удобства монтажа и минимизации ошибок возле каждого разъема имеется соответствующее текстовое или графическое обозначение.

В качестве языка программирования для разработки программного обеспечения контроллера был выбран C++. Программа должна предлагать пользователю варианты соединения с контролером ДГУ для считывания уставок, редактирования и записи в контроллер ДГУ. Доступ к редактированию параметров должен быть защищен паролем. В отдельном разделе должна выводиться сводная таблица, показывающая текущее состояние ДГУ и контроллера. Для генератора должен быть предусмотрен выбор типа обмоток, их количество, номинальные электрические характеристики и уровни предельно допустимых значений по частоте, току и напряжению для обеспечения защит. Должна предусматриваться возможность отключения контроля генератора, если ДВС используется для привода компрессора или насоса. Выбор коэффициента трансформации требуется для возможности использования различных токовых датчиков.

Для ДВС требуется наличие возможности использования различных типов датчиков с выбором наиболее популярных моделей из предлагаемого списка и настройки прочих датчиков путём построения графика

зависимости сопротивления от измеряемого параметра. Настройка временных параметров должна обеспечивать реализацию различных алгоритмов включения/выключения исполнительных устройств (стартер, топливный клапан, свеча накала и т.д.) и оптимальную защиту механизмов и потребителя электроэнергии. Таймер очередного обслуживания должен быть рассчитан на различные сроки замены масла и фильтров.

Для решения проблемы использования контроллера при низких температурах, связанной с утратой способности к индикации ЖК-дисплея, была разработана и реализована возможность удалённого мониторинга и управления контроллером на базе микропроцессорной сенсорной панели оператора Weintek. Основным фактором при выборе данной панели служила сопутствующая удобная среда разработки прошивки (программного обеспечения) EasyBuilderPro, возможность загрузки ПО с ПК через Ethernet или с USB-флешки. Подключение контроллера к панели оператора может быть как через порт RS-485, так и через Ethernet, однако при работе в среде разработки с периодической выгрузкой проекта в панель через Ethernet и подключенным контроллером, соответственно, через RS-485, было принято решение оставить подключение через RS-485. В EasyBuilder Pro реализована как интерфейсная, так и функциональная часть, обеспечивающая удобную разработку проектов для операторской панели.

Таким образом, использованные технические решения и подобранные электронные компоненты контроллера позволяют более полно использовать функционал центрального процессора и оставляют широкие возможности для программной модернизации устройства, а также служат основой для разработки более сложных контроллеров ДГУ, целью которых станет автоматическая синхронизация группы электроагрегатов с распределением нагрузки, что может являться предметом дальнейших исследований.

Использованные источники:

1. Распределённая энергетика в России: потенциал развития [Электронный ресурс]//Энергетический центр Московской школы управления СКОЛКОВО. -2018. (дата публикации: 01.02.2020). - URL://energy.skolkovo.ru/ (дата обращения: 15.06.2023)
2. Антипов М.А., Лемешко В.Ю.; Общество с ограниченной ответственностью «Энергетический центр «Президент-Нева». Устройство управления дизель-генераторным агрегатом. Патент № 71011U1 РФ, МПК G05B 15/02 H02P 9/00. № 2007131463/22; Заявл. 08.08.2007; Оpubл. 20.02.2008, Бюл. №5.
3. Логвинов С.А.; Система управления дизель-генераторной установкой. Патент № 2779822С2 РФ, МПК H02P 9/04 H02J 9/06. №2021103084; Заявл. 09.02.2021; Оpubл. 13.09.2022, Бюл. № 26.
4. Андреева А.Н.; Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственное объединение «Тэтра электрик». Универсальная система управления дизель-генераторной установкой. Патент № 101600U1 РФ, МПК H02P 9/04. № 2010141960/07; Заявл. 14.10.2010; Оpubл. 20.01.2011 Бюл. № 2.
5. Scott R. Schaper, Richard L. Proctor, Donald P. Aupperle; Acutra, Inc. Generator controller. United States patent US 7,353,084 B2. 2008b Apr. 1.
6. Dan G. Priem, Brooklyn Center; Cummins Power Generation IP, Inc. Genset remote start control. United States patent US 10,008,965 B2. 2018, Jun 26.
7. Шаляпин В. В. Основы микропроцессорной техники: учеб пособие / Шаляпин В. В. / 2011. — 214 с.