

Измеритель уровня воды с линейчатым индикатором

Сергей Бирюков

В системе водоснабжения дачного дома накопительным элементом служит полиэтиленовая бочка объёмом 160 литров, установленная на чердаке [1]. Весьма полезным дополнением к системе является описываемый в этой статье измеритель уровня воды в бочке.

Особенностью измерителя, его главным отличием от описанных ранее [2–4] является использование многоцветного светодиодного блока В20ВРGYR, позволяющего индицировать 20 уровней [5]. В блоке установлены светодиоды четырёх цветов, по пять каждого цвета – красного, жёлтого, зелёного и синего. Светодиоды красного цвета обычно применяют для отображения аварийной ситуации или близкой к ней, например, значительного превышения номинального напряжения. В данном измерителе красный цвет означает снижение уровня воды до критического значения. Допустимый уровень воды отображается жёлтым цветом,

нормальный – зелёным, полная бочка – синим.

Датчиком измерителя является конденсатор, образованный двумя обкладками из полос фольги, укрепленными на наружной поверхности бочки вертикально с противоположных сторон. Ёмкость изготовленного датчика практически линейно зависит от уровня воды в бочке – от 7 пФ для пустой бочки до 270 пФ для почти полной.

Схема предлагаемого индикатора приведена на рис. 1. На компараторе DA1.1 собран генератор коротких импульсов отрицательной (относительно плюсовой шины питания) полярности. Частота повторения импульсов 10 кГц, длительность – 8 мкс. Импуль-

сы с выхода DA1.1 через диод VD2 разряжают ёмкость датчика BC1, которая в паузе между импульсами генератора заряжается током через резисторы R7 и R8.

Во время действия импульса через диод VD3 на прямой вход компаратора DA1.2 поступает напряжение, меньшее, чем на инверсный вход этого компаратора, что объясняется более низким падением напряжения на диоде VD3 типа КД510А, чем на диоде VD2 КД503Б. В результате на выходе компаратора напряжение близко к нулю.

После окончания импульса оба диода закрываются, и начинается зарядка ёмкости датчика уровня BC1, при этом на прямой вход компаратора DA1.2 приходит напряжение с делителя R9R10, на инверсный – меньшее напряжение с заряжающейся ёмкости датчика, и на его выходе напряжение близко к напряжению питания.

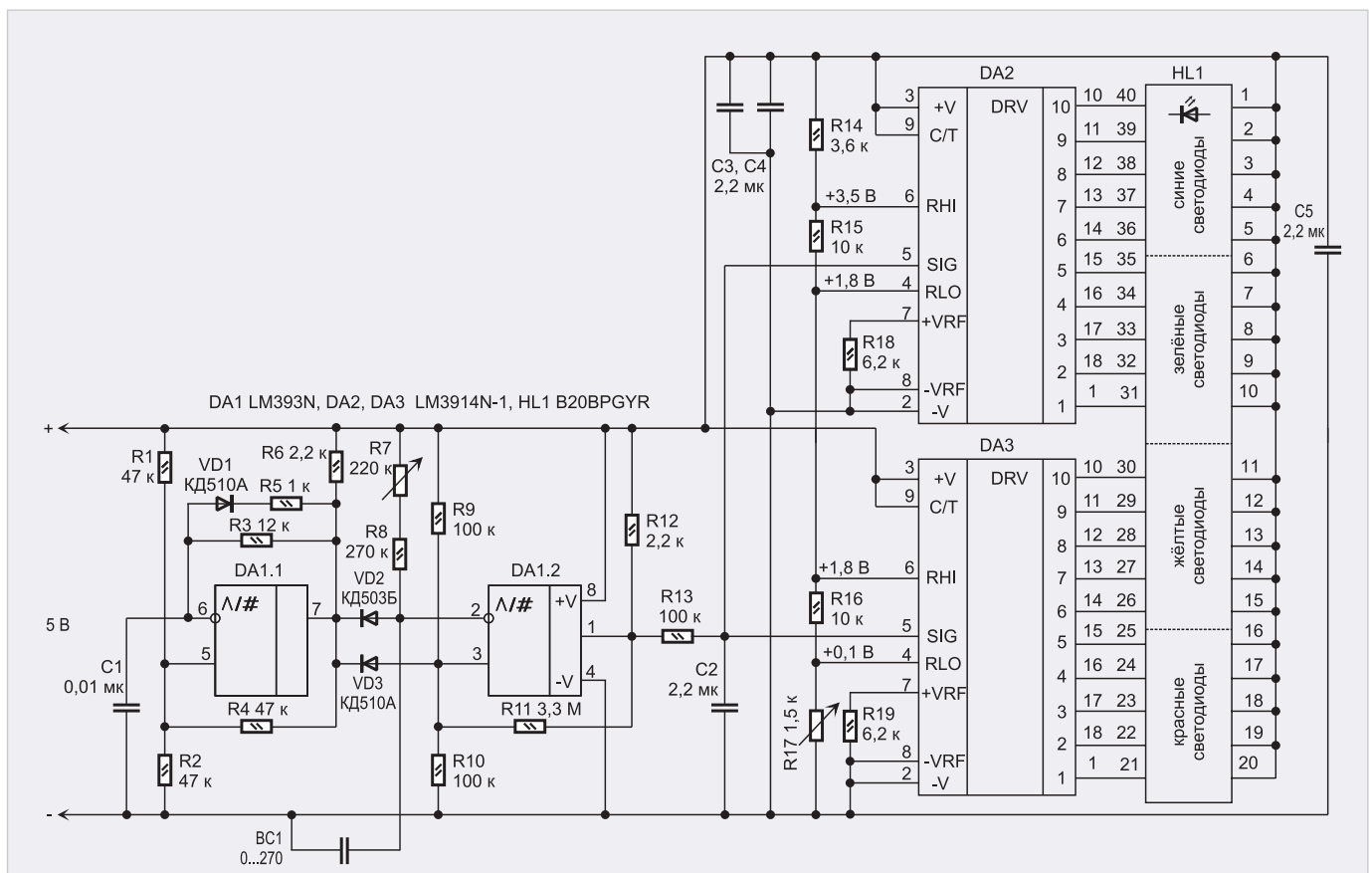


Рис. 1. Принципиальная схема измерителя

При ёмкости датчика $C_{вс1} = 270$ пФ, соответствующей заполненной бочке, постоянная времени зарядки при среднем положении движка R7 составляет:

$$\begin{aligned}\tau &= \left(\frac{R7}{2} + R8\right) \times C_{вс1} = \\ &= 370 \times 10^3 \times 270 \times 10^{-12} \approx \\ &\approx 10^{-4} \text{ с} = 100 \text{ мкс},\end{aligned}$$

что соответствует периоду генератора импульсов на компараторе DA1.1.

На рис. 2 приведены временные диаграммы работы измерителя. Начало отсчёта времени совпадает с началом импульса отрицательной полярности на выходе DA1.1.

За счёт положительной обратной связи через резистор R11 компаратор DA1.2 работает в режиме инвертирующего триггера Шмитта с порогом включения $U_{пор}$, равным половине напряжения питания. Пока напряжение на ёмкости датчика ниже этого уровня, на его выходе напряжение близко к напряжению питания (жёлтая линия). Когда напряжение на входе пересекает указанный уровень, триггер Шмитта переключается, напряжение на его выходе становится близким к нулю.

Время, требуемое для зарядки ёмкости датчика до срабатывания триггера Шмитта, прямо пропорционально этой ёмкости и, соответственно, измеряемому уровню воды.

Таким образом, на выходе DA1.2 формируются импульсы положительной полярности, длительность которых прямо пропорциональна уровню воды. При ёмкости датчика $C_{вс1} = 270$ пФ и пороговом напряжении триггера Шмитта $U_{пор}$, равном половине напряжения питания $U_{пит}$, коэффициент заполнения импульсов $K_{и}$ составит

$$K_{и} = \ln \frac{U_{пит}}{U_{пит} - U_{пор}} = \ln 2 \approx 0,7.$$

Цепочка R13C2 с постоянной времени 220 мс усредняет импульсы, и на конденсаторе C2 формируется постоянное напряжение, прямо пропорциональное уровню воды. При ёмкости датчика 270 пФ оно составит примерно 0,7 от напряжения питания, т.е. $5 \text{ В} \times 0,7 = 3,5 \text{ В}$. У этого напряжения есть небольшая «подставка», связанная с ёмкостями соединительных проводов и с собственной ёмкостью датчика при отсутствии воды.

Для управления светодиодным блоком HL1 используются две микросхемы – драйверы светодиодов LM3914N-1

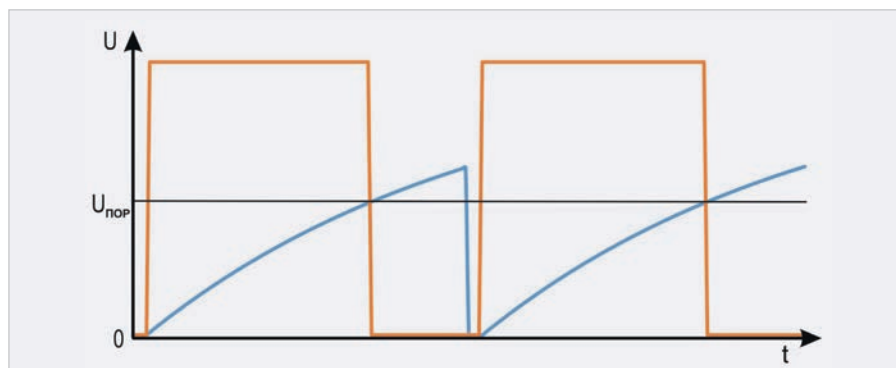


Рис. 2. Временные диаграммы работы измерителя

[6]. Входной ток драйверов по измерительному входу SIG не превышает 100 нА, поэтому никакого буферного усилителя после сглаживающей цепочки не требуется.

Драйверы работают практически независимо один от другого, общим для них является только делитель напряжения R14–R17. Делитель обеспечивает на входах RHI и RLO напряжения, указанные на схеме. Для включения светодиодов в режиме «столбика» входы управления режимом С/Т подключены к плюсу питания.

Пока напряжение на измерительном входе SIG микросхемы DA3 находится в пределах, указанных на её входах, на светодиодном блоке HL1 светится столбик из соответствующего числа светодиодов, но не более десяти. Если напряжение на входах SIG превысит уровень RHI микросхемы DA3, равный уровню RLO DA2, в работу включается микросхема DA2, начнут светиться светодиоды верхней половины блока HL1, все светодиоды нижней половины останутся выключёнными.

Как показано выше, порог индикации верхнего уровня воды должен составлять 0,7 напряжения питания, примерно такое напряжение задаётся делителем на входе RHI микросхемы DA2. «Подставка» компенсируется подстройкой резистора R17, задающего напряжение на входе RLO (нижнем выводе внутреннего делителя). При расчёте делителя R14–R17 учтено, что сопротивление внутренних делителей LM3914N-1 (между выводами RHI и RLO) составляет 10 кОм.

Встроенные в микросхемы DA2 и DA3 источники опорного напряжения не используются, поскольку пороги должны быть пропорциональны напряжению питания, а не стабилизированными.

Токи через светодиоды задаются резисторами R18 и R19, они определяются по формуле $I_{сд} = 12,5/R$ (мА, В, кОм) и при указанных на схеме сопротивлениях 6,2 кОм составляют около 2 мА.

В измерителе использованы постоянные резисторы МТ, МЛТ и их импортные аналоги, R7 – многооборотный резистор из Алиэкспресс [7] и R17–СП3-19а. Рисунок проводников печатной платы позволяет установить в качестве R7 и R17 подстроечные резисторы любого из указанных типов. Конденсатор C1–КМ-6, C2–C5 – для поверхностного монтажа типоразмера 0603. Микросхема LM393N может быть заменена на K1401CA3 или KP1040CA1.

Диоды VD2 и VD3 должны иметь различающееся не менее чем на 20 мВ падение напряжения при токах порядка 10 мкА...1 мА. Проверить это можно при помощи цифрового мультиметра, имеющего режим контроля диодов. При работе в этом режиме на дисплее мультиметра индицируется падение напряжения на диоде при некотором небольшом токе, вполне подходящем для такого измерения. Также можно измерить падение напряжения на диодах при помощи прибора Mega328 или любого другого аналогичного.

Вполне возможно, что из нескольких однотипных диодов можно подобрать такую пару, но, если использовать диоды указанных на схеме типов, подбор не требуется. Используемые автором взятые случайным образом диоды имели разность падений напряжения около 80 мВ.

Если не устанавливать диод VD3, «подставка» существенно увеличивается, поскольку длительность импульсов положительной полярности на выходе компаратора DA1.2 суммируется с длительностью импульсов на выходе DA1.1.

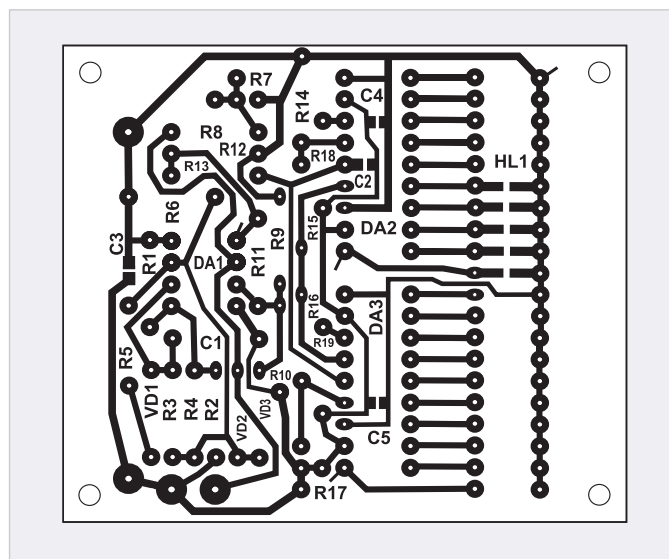


Рис. 3. Печатная плата измерителя

Все детали измерителя установлены на печатной плате размером 65×55 мм из односторонне фольгированного стеклотекстолита толщиной 1,5 мм, чертёж платы приведён на рис. 3, расстановка деталей на рис. 4, фото на рис. 5. Собственно рисунок печатных проводников занимает площадь 55×55 мм, что позволяет повернуть его на 90° для более удобной установки в корпусе.

Для подключения источника питания и датчика в плату впаяны штыревые контакты диаметром 1 мм. На стороне печатных проводников вытравлены позиционные обозначения большинства элементов, что облегчает сборку и настройку измерителя.

Микросхемы установлены в соответствующие панельки, а светодиодный индикатор – в два отрезка гнездных линеек [8], впаянных в печатную плату. Для подключения источника питания, в качестве которого используется стандартное зарядное устройство смартфона, использован разъём Type-C [9].

Измеритель собран в пластмассовом корпусе с габаритными размерами 100×60×25 мм. Общий вид измерителя приведён на рис. 6.

Для изготовления датчика использованы полосы шириной 120 мм из фольги для кулинарной выпечки и длиной, соответствующей высоте бочки. Для подключения использованы узкие полоски медной фольги, которые завернуты в концы полос фольги датчиков, к этим полоскам припаяны проводники к измерителю. Полосы закреплены на поверхности бочки при помощи липкой упаковоч-

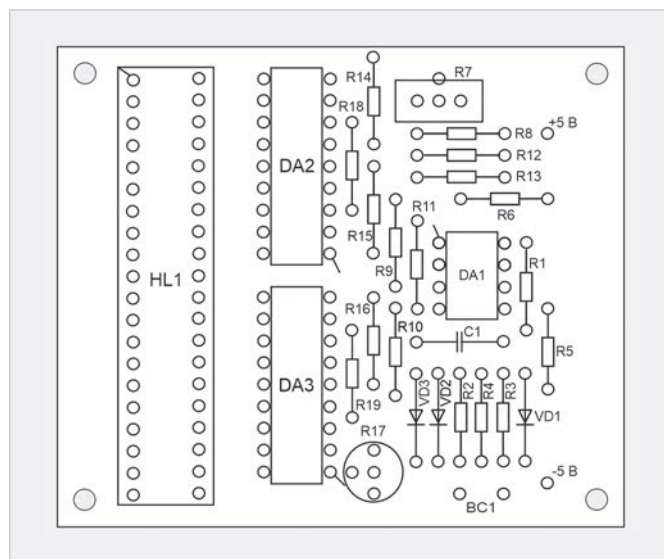


Рис. 4. Расстановка деталей на плате

ной плёнки. Если расстояние между бочкой и платой преобразователя больше двух метров, для уменьшения влияния ёмкостной связи между проводниками можно увеличить ёмкость датчика за счёт использования полос фольги вдвое большей ширины, при этом необходимо будет уменьшить сопротивление резисторов R7 и R8 в два раза.

Настройка измерителя несложна. Удобно использовать вместо датчика конденсатор с ёмкостью, соответствующей почти полной бочке. Необходимо подключить его ко входу измерителя и, изменяя сопротивление резистора R7 от максимального значения в сторону уменьшения, добиться погасания светодиода, соответствующего максимальному уровню. Далее, регулируя его в противоположную сторону, снова зажечь этот светодиод. Затем при подключении ёмкости, соответствующей пустой бочке, вращением движка резистора R17 добиться зажигания светодиода, соответствующего минимальному уровню.

В связи с тем, что регулировки взаимосвязаны, рекомендуется повторить вышеописанные операции. Если ёмкость датчика при полной бочке значительно отличается от 270 пФ, необходимо обратно пропорционально ей изменить суммарное сопротивление резисторов R7 и R8.

Осциллограммы работы изготовленного измерителя, приведённые на рис. 7, повторяют кривые на рис. 2, небольшое отличие заключается в том, что разрядка ёмкости датчика происходит не до нуля, а до падения

напряжения на диоде VD2, составляющего 0,6–0,7 В.

Для питания измерителя не обязательно использовать источник 5 В, поскольку компараторы микросхемы LM393N и драйвер LM3914N-1 не критичны к напряжению питания, а при изменении напряжения питания и сигнал, и пороги драйвера изменяются пропорционально. Можно, например, использовать стабилизированный адаптер на 9 или 12 В.

Если индикатор впаять в плату со стороны печатных проводников (так сделано в [3]), при минимальных уровнях воды будут включаться синие светодиоды, при максимальных – красные.

При первом включении измерителя обнаружилось, что зелёные светодиоды индикатора светятся значительно ярче, чем светодиоды других цветов, это заметно на фото рис. 6. Для снижения яркости параллельно им были подключены резисторы КИМ-0,05 сопротивлением 1,3 кОм. Для возможной установки резисторов поверхностного монтажа на чертеже проводников печатной платы (рис. 3) добавлены соответствующие контактные площадки.

Если желательно осуществлять индикацию уровня не в виде столбика, а в виде одного светящегося светодиода, необходимо отсоединить вход С/Т (вывод 9) микросхем DA2 и DA3 от плюса питания. Далее, вывод 9 микросхемы DA2 подключить к её же выводу 11, а вывод 9 DA3 к выводу 1 DA2. Также необходимо между выводом 11 DA3 и плюсом питания установить резистор 20 кОм.

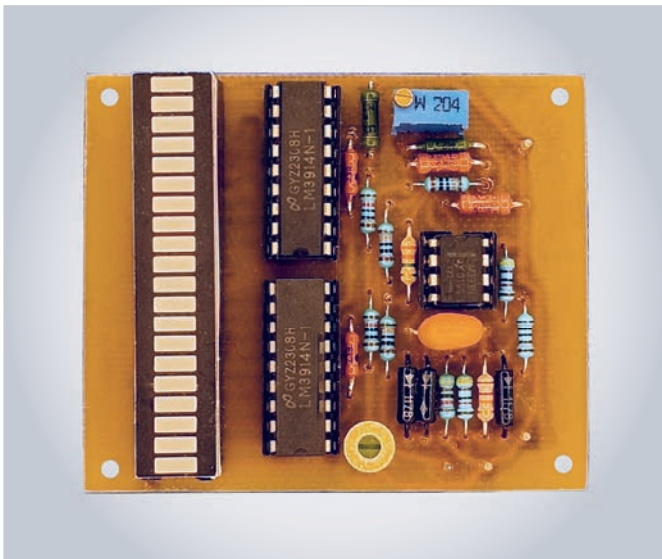


Рис. 5. Внешний вид платы

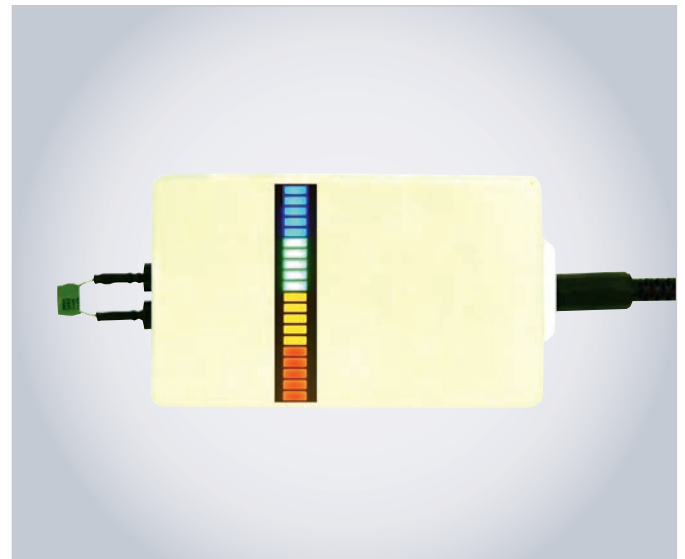


Рис. 6. Общий вид измерителя

Если необходима индикация уровня воды в металлической ёмкости, можно использовать датчик из металлопластиковой трубы, применяемой в системах водоснабжения [4], при этом необходимо уточнить сопротивление резисторов R7 и R8.

На основе данного измерителя можно изготовить автомат, выключающий насос при наполнении бочки и включающий его, когда уровень воды опустится ниже определённой отметки. Возможный вариант схемы такой доработки измерителя приведён на рис. 8, для неё желательно использовать напряжение питания измерителя 12 В. Возможность сохранения для питания напряжения 5 В будет рассмотрена далее.

Логическим элементом, определяющим необходимость включения или выключения насоса, является своеобразный триггер на мажоритарном клапане DD1. Этот триггер работает следующим образом. Если на двух нижних (по схеме) входах мажоритарного клапана высокий логический уровень, на выходе также лог. 1, если на этих входах низкий уровень, на выходе также лог. 0. Если на этих входах разные уровни, триггер хранит своё предыдущее состояние.

При включении любого светодиода индикатора HL1 на соответствующем выходе микросхемы DA2 или DA3 напряжение на 1,7–2,5 В ниже напряжения питания, что определяется падением напряжения на светодиодах разных цветов. Для выключения светодиода соответствующий ему ключ микросхемы DA2 или DA3 закрывается, и его выходной ток становится

близким к току утечки закрытого транзистора. Можно считать, что цепи между выходами микросхем DA2 и DA3 и светодиодами в этом случае переходят в состояние обрыва и напряжение на них не определено. Если измерить вольтметром напряжение между выходом микросхемы DA2 или DA3 и общим проводом, оно будет близко к 3,5 В, оно будет равно нулю, если вольтметр подключить параллельно выключенному светодиоду. Ни то, ни другое состояние выходов микросхем DA2 и DA3 при управлении светодиодами не соответствует логическим уровням КМОП.

Для приведения уровней в этих цепях к нормальным для микросхем КМОП установлены резисторы R20–R23. Резисторы R22 и R23 включены в разрыв цепей от выходов DA2 и DA3 к светодиодам индикатора HL1,

a R20 и R21 шунтируют эти светодиоды. В результате для выключенных светодиодов напряжение на них равно нулю и на входах микросхемы DD1 высокие логические уровни.

Выходные каскады микросхем LM3914N-1, управляющие светодиодами, построены по схеме генераторов тока. Они нагружены на светодиоды, и напряжение на выходах микросхем при включении светодиодов, как указано выше, на 1,7–2,5 В ниже напряжения питания. Резисторы R22 и R23, включённые в разрыв цепей от выходов DA2 и DA3 к светодиодам, переводят выходные транзисторы микросхем DA2 и DA3 в режим насыщения, и сигналы на этих выходах становятся близкими к нулю, что обеспечивает нормальную работу микросхемы DD1.

При индикации в режиме столбика и при пустой бочке все светоди-

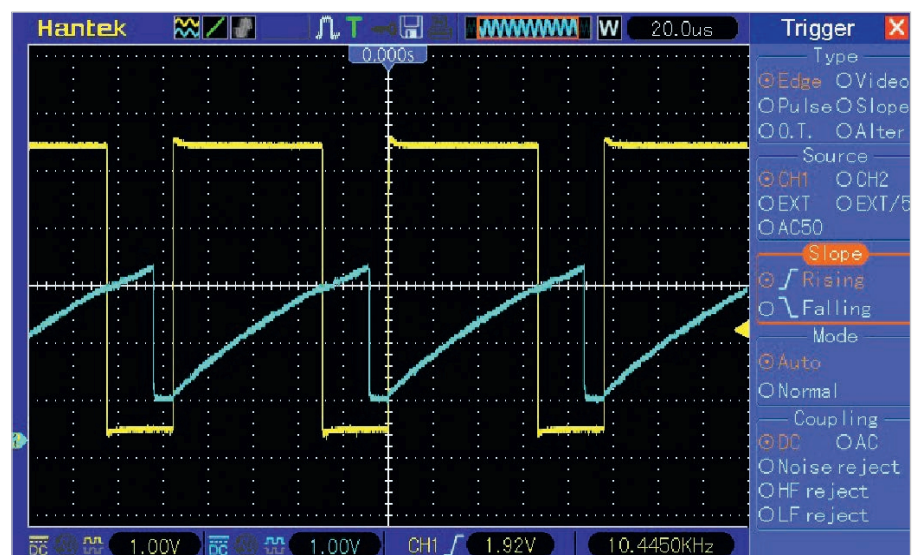


Рис. 7. Осциллограммы работы измерителя

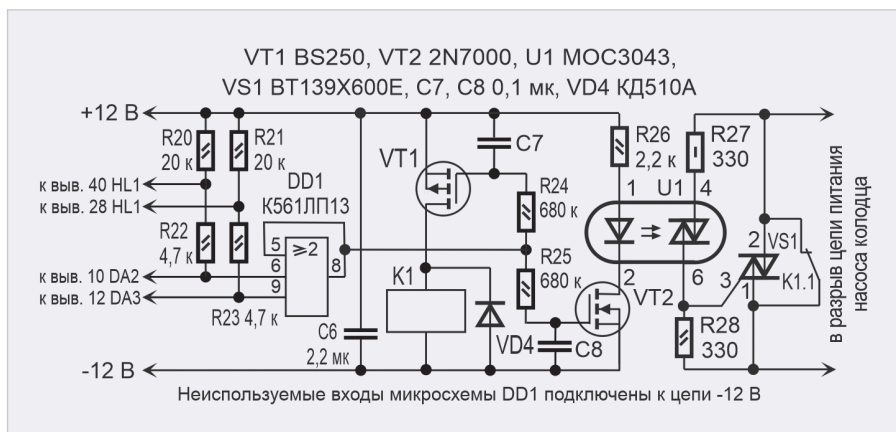


Рис. 8. Схема автомата для включения насоса

оды индикатора HL1, кроме самого нижнего, выключены, и на выходах микросхем DA2 и DA3, подключённых ко входам DD1, напряжение 12 В, уровень на выходе DD1 – лог. 1. Транзистор VT1 выключен, реле K1 выключено, его контакты K1.1 замкнуты. Включён транзистор VT2, через излучающий светодиод оптрона U1 течёт ток, но симисторы оптрона и VS1 не включаются, поскольку они замкнуты контактами K1.1 реле. Насос, накачивающий воду в бочку, включён.

По мере наполнения бочки светодиоды поочерёдно включаются, но на выходе DD1 сохраняется лог. 1, насос работает. Когда включится самый верхний светодиод (подключённый к выводу 40 HL1), на обоих входах микросхемы DD1 появятся уровни лог. 0, на выходе DD1 также лог. 0.

Напряжение лог. 0 с выхода DD1 примерно через 20 мс (за счёт задержки на цепочке R24C7) включает транзистор VT1 и реле K1, оно размыкает свои контакты. Поскольку через светодиод оптрона U1 течёт ток, а в момент, предшествующий размыканию контактов реле, напряжение между выводами 4 и 6 оптрона близко к нулю, симистор оптрона U1 включится и включит симистор VS1. Ток работающего насоса будет течь через симистор VS1.

Напряжение лог. 0 с выхода DD1 через резистор R25 начнёт медленно разряжать конденсатор C8, и примерно через 120 мс транзистор VT2 выключится, выключатся оптрон U1 и симистор VS1. Насос выключится.

По мере расхода воды светодиоды поочерёдно гаснут, но на выходе DD1 сохраняется лог. 0, насос выключен. Когда выключится светодиод, подключённый к выводу 28 HL1, на обоих входах микросхемы DD1 появятся уровни лог. 1, на выходе DD1 также лог. 1.

Это напряжение через резистор R25 примерно за 12 мс зарядит конденсатор C8 до порога открывания транзистора VT2, что включит его и оптрон U1, он включит симистор VS1, замкнётся цепь питания насоса. Напряжение лог. 1 на выходе триггера DD1 также вызовет медленную разрядку конденсатора C7 через резистор R24. Примерно через 90 мс ток через обмотку реле K1 прекратится, контакты K1.1 замкнутся и зашунтируют симистор VS1. Далее питание насос будет получать через контакты реле K1.

В результате размыкание и замыкание контактов реле происходит при включённом симисторе и при напряжении на них (в разомкнутом состоянии), не превышающем нескольких вольт, что позволяет рассчитывать на длительный срок службы реле. Более подробно работа узла коммутации мощной нагрузки описана в статье [10].

В конструкции можно применить реле SM1H-12VDC-SL-C на рабочее напряжение 12 В с двумя группами контактов на переключение, сопротивление обмотки 270 Ом, ток срабатывания 30 мА. Используемые контакты групп следует соединить между собой параллельно. В справочных данных на это реле указано, что его контакты в разомкнутом состоянии могут выдерживать напряжение 240 В переменного тока. При резистивной нагрузке оно может коммутировать ток 16 А при напряжении переменного тока 125 В, а при резистивно-индуктивной ($\cos \phi = 0,4$) – 5 А при 125 В переменного тока. Таким образом, в соответствии с паспортными данными, сколько-нибудь мощную нагрузку с питанием от сети 230 В коммутировать им нельзя. В описываемом измерителе замыкание и размыкание контактов реле происходит при напря-

жении на них (в разомкнутом состоянии), не превышающем нескольких вольт, что исключает искрение и не даёт контактам разрушаться.

Уровень воды, при котором будет включаться насос, определяется номером выхода микросхемы DD3 (или DD2), к которому подключаются резисторы R21 и R23, и не обязательно это вывод, указанный на схеме. Нельзя только для этой цели использовать выходы 1 (вывод 1) DA2 и вывод 9 (вывод 11) DA3, поскольку они внутри микросхем используются в специальных цепях для каскадирования микросхем в режиме точки.

О возможности использования напряжения питания 5 В. Для обеспечения требуемых соотношений задержек включения и выключения транзисторов необходимо, чтобы они надёжно включались при напряжении на затворе в три-пять раз меньше напряжения питания, т.е. при 1,0–1,6 В. Можно использовать транзисторы Si2300DS (n-канал) и Si2301BDS (p-канал). Следует учесть, что они выпускаются только в корпусах SOT-23 для поверхностного монтажа.

Для напряжения питания 5 В сопротивление резисторов R22 и R23 необходимо уменьшить до 1 кОм, а реле K1 должно иметь обмотку, рассчитанную на 5 В, например, SM1H-05VDC-SL-C.

Шланг с обратным воздушным клапаном [1] для исключения последствий аварийного перелива установить обязательно!

Литература

1. Бирюков С. Водоснабжение на даче // САМ. 2015. № 6. С. 12–14.
2. Бирюков С. Измеритель уровня воды // Радио. 2020. № 4. С. 60, 61.
3. Бирюков С. Индикатор уровня воды // Радио. 2024. № 2. С. 39–41.
4. Кравцов В. Ёмкостный уровнемер электропроводящих жидкостей с линейной шкалой // Радио. 2023. № 9. С. 47–50.
5. Многоцветный светодиодный дисплей. URL: <https://ali.click/qi2i418>.
6. Микросхема LM3914N-1. URL: <https://ali.click/b24i41y>.
7. Подстроечные резисторы. URL: <https://ali.click/3y2i41m>.
8. Однорядная гнездовая розетка. URL: <https://ali.click/zc3i41r>.
9. Разъём Type-C. URL: <https://ali.click/zq3i41u>.
10. Бирюков С. Ремонт холодильника // Радио. 2023. № 5. С. 37–40.

