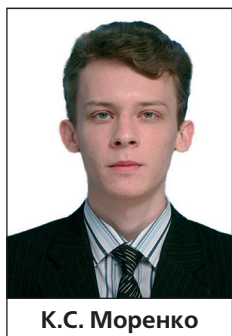


ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ TL494 В УПРАВЛЕНИИ ПРИВОДОМ РАЗМОТКИ



К.С. Моренко



С.А. Моренко

Существует много проблем автоматизации намоточных станков в сфере ремонта. Одним из направлений такой автоматизации является автоматизация размотки провода с катушки-источника. В статье приведена схема управления таким приводом. Практическая эксплуатация показала надежность и удобство использования такой автоматизации в сфере ремонта.

Ключевые слова: ремонт, сервис, намоточный станок, TL494, операционный усилитель

EDN: HGXMHA

Автоматизация управления в настоящее время является бурно развивающейся областью знаний. Хотя основы автоматизации управления и ее математический аппарат были заложены еще в прошлом веке, широкое применение она стала находить повсеместно только с развитием средств управления. Автоматизация управления позволяет получить множество полезных экономических эффектов.

Одной из перспективных областей для автоматизации остается сфера ремонта машин и оборудования. Здесь автоматизация развита меньше, чем в области производства. Основная причина такого положения вещей — многообразие ситуаций, с которыми приходится иметь дело при ремонте, что делает автоматизацию в этой области на порядок более сложной задачей.

Намоточные станки, предназначенные для ремонтных работ, отличаются от производственных. В ремонте большинство задач являются однократными или повторяются сравнительно редко, в производстве же намоточные станки работают по одной и той же программе. Для производственного намоточного станка не нужна постоянная настройка, а для ремонтного нужен удобный интерфейс оператора, потому что каждая задача отличается от предыдущей и требует настройки. В автоматизации намоточных станков есть еще много нерешенных задач [1].

В статье рассматривается автоматизация размотки провода с катушки-источника. Принудительная размотка провода в ручном или автоматическом виде является обязательной операцией для станков, работающих с тонкими проводами [2]. Применение авто-

Моренко Константин Сергеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (ФГБНУ ФНАЦВИМ). Область научных интересов: возобновляемая энергетика, электроника. Автор 46 научных работ, в том числе одной монографии. Имеет три патента на изобретения.

Моренко Сергей Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электрификация и электроснабжение» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: системы энергетика. Автор 26 научных работ, в том числе одной монографии. Имеет три патента на изобретения.

матизации на этом участке позволяет сократить число обрывов провода и повысить качество наматываемых катушек.

Хотя использование микроконтроллера может выглядеть целесообразным для реализации данной задачи, оно имеет свои ограничения. Использование микроконтроллера (для целей размотки) означает дополнительную и довольно сложную технологическую операцию — программирование. Желательно, чтобы разрабатываемое устройство размотки вообще не требовало никакой настройки, тем более — программирования. Стоимость является вторым ключевым фактором — для оснащения возможно большего количества ремонтных предприятий следует сделать устройство возможно более дешевым, а при использовании микроконтроллера мы не только увеличиваем стоимость устройства, но и прибавляем амортизационную стоимость дополнительного оборудования по программированию.

Для повышения качества и эффективности ремонтных работ следует использовать возможно меньшее количество дополнительных узлов. В рассматриваемом случае используется намоточный станок с управлением шпинделем с помощью микросхемы TL494. Эти микросхемы находят широкое применение в управлении нагрузкой (например, для компьютерных блоков питания) и устройствах на их основе [3]. Наилучшим решением будет использование возможно большего количества модулей этой микросхемы с минимальным количеством внешних компонентов, реализующих задачу управления.

Цель исследования

Обосновать и проверить возможность использования операционных усилителей обратной связи TL494 для обработки аналоговых сигналов датчика Холла и управления электродвигателем размотки намоточного станка.

Материалы и методы

Датчик Холла марки 49Е — линейный датчик магнитного поля. Обладает небольшими размерами, низким энергопотреблением (4 мА при напряжении питания 5 В), высокой линейностью и чувствительностью (15–30 мкВ/Тл). Широко применяется в системах управления электродвигателями, датчиках положения, энкодерах, датчиках тока. Датчик используется из-за возможности бесконтактного управления и из-за возможности измерять положение или расстояние. Часто такие датчики используются в устройствах измерения частоты вращения [4]. Хотя такие датчики подвержены разнообразным погрешностям, (например [5]), в разрабатываемом устройстве отклонение

от конечного положения на несколько миллиметров не имеет такого значения как сама автоматизация размотки.

Выход используемого датчика Холла реализован по схеме открытого коллектора на положительное напряжение питания. Прямое подключение его к операционному усилителю приводит к постоянной размотке провода. Из-за высокого входного сопротивления операционного усилителя положительное напряжение в 5 В (напряжение питания датчика) постоянно удерживает выход операционного усилителя выше 0 В. Эта особенность не описана в документации и была обнаружена в ходе экспериментальных исследований.

Включение операционного усилителя по схеме дифференциального усилителя позволяет получить разность двух напряжений, каждое из которых предварительно умножается на константу, определяемую отношением резисторов. На рис. 1 приведена схема включения операционного усилителя в качестве дифференциального усилителя.

Выходное напряжение будет иметь две составляющих: синфазную $V_{\text{сinf}} \sim ((V_6 + V_d)) / 2$ и дифференциальную $V_{\text{diff}} \sim V_6 - V_d$. Чтобы избавиться от синфазной составляющей, необходимо выполнить условие

$$\frac{R_d}{R_f} = \frac{R_n}{R_{f+}}.$$

Для упрощения схемы и сокращения числа компонентов, выберем $R_d = R_n = R_\Sigma$, а $R_f = R_{f+} = R_f$. В этом случае коэффициент передачи для синфазной составляющей становится равным 0, а для дифференциальной принимает вид

$$V_{\text{out}} = \frac{R_f}{R_\Sigma} (V_6 - V_d) = k(V_6 - V_d).$$

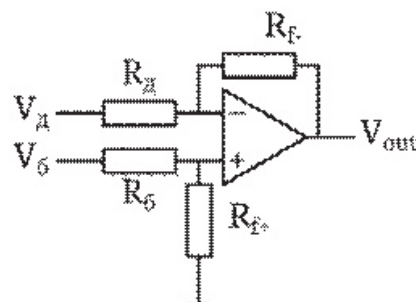


Рис. 1. Схема включения операционного усилителя с дифференциальной обратной связью

При этом соотношение $k=R_f/R_\Sigma$ определяет коэффициент усиления дифференциального напряжения.

В рассматриваемой схеме дифференциальный усилитель с исключенной синфазной составляющей применяется для получения разности напряжения на датчике и опорного напряжения — для вычитания постоянной составляющей выходного напряжения датчика в 2,5 В, когда магнит находится далеко от него. Для этого используется делитель, подключенный ко входу V_6 .

Хотя существуют и схемы с иными качественными характеристиками (например, [6]), в разрабатываемом устройстве используется типовое решение еще и потому что оно позволяет сократить разнообразие пассивных элементов.

Операционный усилитель, включенный по схеме суммирующего усилителя, суммирует входные напряжения, применяя к каждому свой собственный весовой коэффициент, определяемый входным резистором. На рис. 2 приведена схема включения операционного усилителя в качестве сумматора напряжений. Хотя для суммирования напряжений в прецизионных устройствах применяются гораздо более сложные схемы (например, [6], для целей данной работы достаточно возможностей классического подхода.

Выходное напряжение в общем случае составляет

$$V_{out} = -V_1 \frac{R_f}{R_1} - V_2 \frac{R_f}{R_2} + V_3 \frac{R_f}{R_3} + V_4 \frac{R_f}{R_4}.$$

Аналогичное выражение справедливо для любого количества входов суммирования. В случае, если $R_1=R_2=R_3=R_4=R_\Sigma$, суммирование происходит с одинаковыми весами и выходное напряжение представляет собой

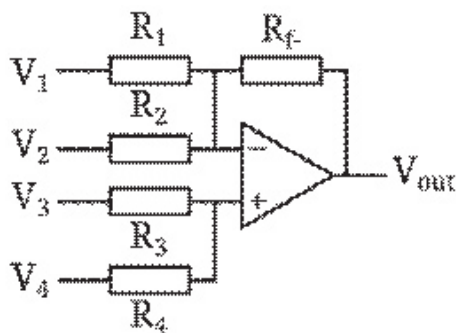


Рис. 2. Схема включения операционного усилителя в качестве сумматора напряжений

$$V_{out} = \frac{R_f}{R_\Sigma} (-V_1 - V_2 + V_3 + V_4).$$

При этом отношение $R_f/R_\Sigma=k$ представляет собой обратную связь.

В разрабатываемой схеме суммирование напряжения используется для сложения напряжения балансировки (нейтрального состояния датчика Холла, когда на его выходе устанавливается 2,5 В) и напряжения обратной связи с обмотки электродвигателя привода размотки для компенсации напряжения датчика Холла.

Делители напряжения являются базовой конструкцией электронных схем с момента возникновения необходимости в согласовании уровней напряжения в сторону уменьшения. Фактически, они являются масштабными преобразователями [7]. В настоящее время для измерения высоких напряжений без необходимости гальванической развязки применяются высоковольтные делители напряжения. В рассматриваемом устройстве будет использоваться низковольтная «классическая» схема делителя напряжения для согласования уровней напряжений на входах операционного усилителя. Принципиальная схема такого делителя приведена на рис. 3.

В разрабатываемом устройстве такой делитель будет использован в двух ролях. Во-первых — для компенсации «нейтрального» состояния датчика Холла, когда на его выходе напряжение равно 2,5 В. Во-вторых — для установки и ограничения выходного напряжения привода размотки, для согласования уровня напряжения привода размотки и входного напряжения операционного усилителя.

Результаты и обсуждение

Основные требования к разрабатываемой системе можно разделить на группы: пользовательские тре-

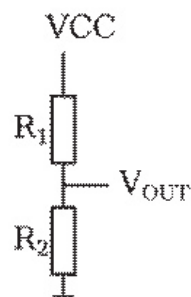


Рис. 3. Принципиальная схема низковольтного делителя напряжения

бования, требования проектирования, требования производства и требования согласования.

К пользовательскому требованию относится возможность регулировки скорости размотки провода. При использовании датчика Холла с линейной характеристикой это требование можно представить как установку максимальной скорости размотки при максимальном отклонении рычага натяжения. Это требование возникает из необходимости работать с катушками провода разных геометрических размеров и разным диаметром провода. В разрабатываемом устройстве оно реализуется делителем выходного напряжения в цепи обратной связи.

К требованиям проектирования относится возможность подстройки типового решения для работы с разными датчиками с различными выходными напряжениями. С точки зрения датчиков нас интересуют как напряжение нулевой точки, так и диапазон напряжений в крайних положениях. В разрабатываемой схеме оба эти параметра могут быть подстроены с помощью изменений номиналов резисторов в делителях — то есть без изменения собственно схемы.

Производственным требованием к разрабатываемой схеме размотки является использование минимального разнообразия электронных компонентов. Хотя в рассматриваемом случае используются номиналы, не привязанные к конкретному списку компонентов (в рамках целого устройства, а не отдельного модуля), при привязке модуля размотки к конкретному намоточному станку номиналы могут быть скорректированы для удовлетворения этого требования.

Требование согласования при использовании TL494 в рассматриваемой схеме состоит в том, что напряжение на выходе встроенного операционного усилителя может быть только положительным, и чем больше будет это положительное напряжение, тем меньше будет рабочий цикл и тем ниже будет выходное напряжение и частота вращения привода размотки. Это требование определяет полярность и входы для подключения датчиков и обратной связи в разрабатываемом устройстве.

Датчик Холла установлен на рычаге (рис. 4), который отклоняется натяжением провода. По мере намотки основной катушки натяжение провода увеличивается и магнит приближается к датчику Холла. На выходе датчика Холла напряжение увеличивается от 2,5 В (полностью отведенный магнит) до 4 В (полностью подведенный магнит). Привод размотки запускается и отматывает провод с катушки подачи до тех пор, пока он не начнет свободно провисать. В результате рычаг снова опустится и магнит отодвинется от датчика Холла, а напряжение на датчике Холла упадет до 2,5 В.

Электронная схема управления приводом размотки приведена на рис. 5. Напряжение от датчика Холла поступает через суммирующий резистор R_1 на инвертирующий вход. Для балансировки постоянной составляющей в 2,5 В на неинвертирующий вход поступает напряжение питания через делитель напряжения R_5 и суммирующий резистор R_2 . Выходное напряжение (управления) поступает через делитель R_0 и суммирующий резистор R_3 на неинвертирующий вход. Резисторы R_{f-} и R_{f+} обеспечивают обратную связь.

На схеме есть несколько характерных точек. Они обозначены волнистыми линиями. Рядом с каждой из них указан допустимый диапазон напряжений. Напряжение на выходе датчика Холла должно изменяться в диапазоне 2,5–4 В. Это означает, что магнит и датчик Холла должны иметь определенную ориентацию друг относительно друга, которая приводит к увеличению напряжения при приближении магнита (натяжении провода). Компенсирующее напряжение на делителе R_5 должно совпадать с напряжением на датчике Холла в нейтральном состоянии. Оно должно быть даже немного выше, это позволит полностью остановить размотку провода при отодвинутом магните.

В этой системе управления имеет место следующее уравнение напряжений

$$U_s + U_o = U_{49E},$$

где U_s — напряжение на делителе R_5 ;

U_o — напряжение на делителе обратной связи R_0 ;

U_{49E} — напряжение на выходе датчика Холла.

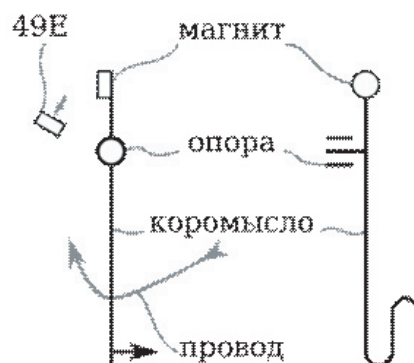


Рис. 4. Конструкция размотки провода с катушки подачи, черной стрелкой показано направление поворота коромысла при натяжении провода

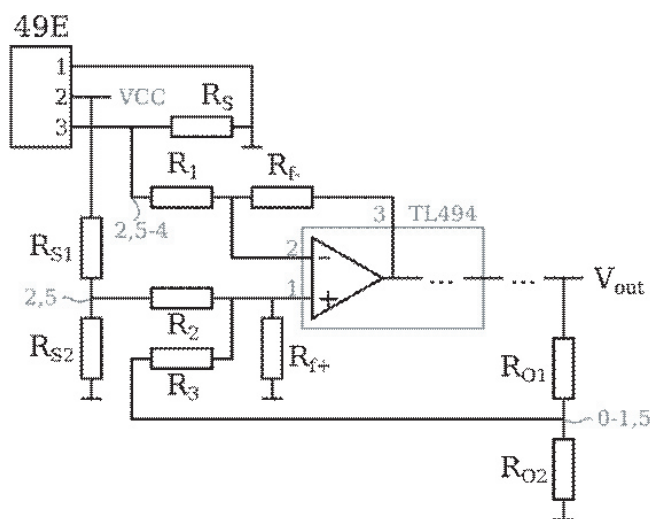


Рис. 5. Схема управления электродвигателем с использованием операционных усилителей

При приближении магнита к датчику Холла, напряжение на нем будет возрастать. Это приведет к снижению напряжения на выходе операционного усилителя ниже 0. В действительности напряжение на выходе будет равным нулю и не будет осуществляться блокировка работы генератора TL494. Напряжение на выходе будет максимально возможным. По мере роста напряжения на выходе, оно через делитель обратной связи R_O будет попадать на неинвертирующий вход и блокировать работу TL494, снижая выходное напряжение. Таким образом

$$U_O = U_{49E} - U_S,$$

то есть напряжение на выходе будет определяться тем, насколько напряжение на выходе датчика Холла превысит компенсационное напряжение с делителя R_S при одновременном ограничении максимального напряжения на управлении через делитель обратной связи R_O .

Настройка схемы заключается в подборе напряжения на делителе R_S , незначительно превышающем напряжение на выходе датчика Холла в нейтральном состоянии и ограничителе выходного напряжения всей схемы так, чтобы на выходе делителя R_O при максимальном выходном напряжении было 1,5 В.

Разработанное устройство может быть использовано как для управления драйвером привода размотки, так и для прямого управления электродвигателем. В случае управления драйвером привода размотки целесообразно установить выходное напряжение

не выше 10 В, чтобы соответствовать стандартному сигналу управления 0–10 В. Когда TL494 управляет приводом напрямую, выходное напряжение должно устанавливаться на электродвигателе размотки. Электродвигатель размотки в этом случае лучше использовать коллекторный, обладающий линейной характеристикой по напряжению.

В ходе эксплуатации на намоточном станке устройство показало работоспособность и адекватную реакцию при намотке провода на всем диапазоне скоростей. Хотя механическая часть может быть доработана балансировкой рычага натяжения в соответствии с диаметром провода, электронная часть полностью соответствует установленным для нее требованиям.

Выводы

Разработанная конструкция позволяет управлять электроприводом размотки без использования микроконтроллера. На небольших намоточных станках управление электродвигателем размотки может осуществляться напрямую TL494 без промежуточного драйвера электродвигателя.

Создана конструкция и система автоматики, которая была проверена на реальном намоточном станке. Электронная часть полностью соответствует приведенным требованиям. Механическая часть может быть доработана механизмом балансировки рычага натяжения провода в соответствии с диаметром используемого провода.

Литература

1. Боннет, Я. В. Автоматизация намоточного станка / Я. В. Боннет, В. В. Боннет. - Текст : непосредственный // Проблемы научной мысли. - 2023. - Т. 5, № 3. - С. 185-188. - EDN ESRJCN.
2. Литвиненко, А. М. Применение намоточных станков для обмоток из сверхтонкого провода / А. М. Литвиненко, Г. А. Пархоменко, Д. С. Баранов. - Текст : непосредственный // Энергия - XXI век. - 2019. - № 1-2 (105-106). - С. 75-78. - EDN KAVYUL.
3. Регулируемый источник постоянного тока на базе компьютерного блока питания / Р. А. Санжаров, А. В. Козлов, П. А. Федин [и др.]. - Текст : непосредственный // Ядерная физика и инжиниринг. - 2022. - Т. 13, № 4. - С. 358-366. - DOI 10.56304/S2079562922030435. - EDN EERQVS.
4. Бутонин, В. А. Принцип разработки устройств, основанных на измерении количества оборотов с помощью датчиков Холла / В. А. Бутонин, Е. С. Сулоева. - Текст : непосредственный // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. - 2023. - Т. 1. - С. 287-290. - EDN LVNXFN.
5. Скатков, И. А. Обработка показаний элемента Холла в концевых датчиках линейных перемещений механизмов / И. А. Скатков, К. Н. Осипов. - Текст : непосредственный // Автоматизация и измерения в машино- приборостроении. - 2022. - № 1 (17). - С. 71-77. - EDN KORBPV.
6. Прокопенко, Н. Н. Неинвертирующий усилитель напряжения на основе мультидифференциального операционного усилителя без резисторов обратной связи / Н. Н. Прокопенко, Н. В. Бутырлагин, А. В. Бугакова. - Текст : непосредственный // Радиоэлектронная техника. - 2015. - № 1 (7). - С. 23-25. - EDN UCRNHF.
7. Масштабные преобразователи высокого напряжения для информационно-измерительных систем / А. С. Ильин, И. А. Карчев, А. А. Большакова, В. П. Перевертов. - Текст : непосредственный // Надежность и качество сложных систем. - 2021. - № 4 (36). - С. 13-19. - DOI 10.21685/2307-4205-2021-4-2. - EDN APMSKT.