

Научная статья
УДК 621-313

Детектор максимального значения мгновенного напряжения для снижения апериодической составляющей пускового тока активно-индуктивной нагрузки

Владимир Валерьевич Пугачёв¹, Салават Вагимович Акчурин²

¹ Оренбургский государственный аграрный университет

² Башкирский государственный аграрный университет

Аннотация. Снижения апериодических составляющих пусковых токов активно-индуктивной нагрузки возможно достигнуть подключением её к питающей сети в моменты максимального значения мгновенного напряжения. Для этого была реализована схема детектора, которая формирует серию прямоугольных импульсов в моменты достижения напряжения максимума. Эти импульсы можно использовать микроконтроллером для определения времени коммутации активно-индуктивной нагрузки.

Ключевые слова: апериодический ток, система коммутации, твердотельное реле.

Для цитирования: Пугачёв В.В., Акчурин С.В. Детектор максимального значения мгновенного напряжения для снижения апериодической составляющей пускового тока активно-индуктивной нагрузки // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2021. № 2 (88). С. 150–153.

Original article

Detector of the maximum value of instant voltage to reduce the aperiodic component in-starting current of the initial-inductive load

Vladimir V. Pugachev¹, Salavat V. Akchurin²¹ Orenburg State Agrarian University² Bashkir State Agrarian University

Abstract. A decrease in the aperiodic components of the starting currents of an active-inductive load can be achieved by connecting it to the mains at the moments of the maximum value of the instantaneous voltage. For this, a detector circuit was implemented, which forms a series of rectangular pulses at the moments when the voltage reaches its maximum. These pulses can be used by the microcontroller to determine the switching time of an active-inductive load.

Keywords: aperiodic current, switching system, solid state relay.

For citation: Pugachev V.V., Akchurin S.V. Detector of the maximum value of instant voltage to reduce the aperiodic component in-starting current of the initial-inductive load. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2021; 88(2): 150–153. (In Russ.).

Современные системы управления различного типа исполнительных механизмов сельскохозяйственного оборудования состоят из микропроцессора или микроконтроллера, в память которых заложен алгоритм выполнения определённой последовательности действий и силовой коммутирующей части, с помощью которой питающее напряжение подключается к исполнительному механизму.

В качестве силовой части чаще всего используются силовые полупроводниковые приборы (биполярные транзисторы, тиристоры, биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT), полевые транзисторы), интегрированные в единый корпус и называемые твердотельными реле. Такого вида устройства имеют свои особенности работы, а именно в них предусмотрены два варианта коммутации питающего напряжения: 1) подача сигнала управления на реле и подключение нагрузки к сети только в момент перехода мгновенного значения напряжения через ноль (**zero crossing**); 2) **случайное включение** напряжения на нагрузке с одновременной подачей сигнала управления на реле (**random switching**).

Твердотельные реле с возможностью контроля перехода мгновенного напряжения через ноль возможно использовать для подключения нагрузки, особенности работы которой не связаны с возникновением больших значений пусковых токов при включении (освещение, нагревательные элементы и т.д.). В такой нагрузке активная составляющая больше, чем индуктивная или ёмкостная, поэтому целесообразно подключать их в момент перехода напряжения через ноль, чтобы снизить ток в начальный момент времени [1].

Материал и методы. Особенности коммутации активно-индуктивной нагрузки не позволяют использовать твердотельные реле с контролем перехода напряжения через ноль. Рассмотрим процесс коммутации цепи с последовательно соединёнными активным и индуктивным сопротивлением. В общем это может быть схема замещения реальной катушки индуктивности,

обладающей сопротивлением r и индуктивностью L , при условии пренебрежения ёмкостью между витками катушки, а также эквивалентной схемой обмотки асинхронного двигателя или обмотки трансформатора.

Дифференциальное уравнение такой цепи имеет вид:

$$L \frac{di}{dt} + ri = u, \quad (1)$$

где $u = u(t)$ – напряжение на зажимах цепи.

Из курса теоретических основ электротехники [2] известно, что для нахождения значений токов $i(t)$ и напряжений $u(t)$ в переходном процессе необходимо найти полные решения дифференциальных уравнений цепи. Полное решение $i(t)$ дифференциального уравнения есть сумма частного решения $i^*(t)$ неоднородного уравнения, т.е. уравнения, содержащего заданные ЭДС или заданные напряжения, и решения $i^{**}(t)$ однородного уравнения, которое получается из того же уравнения цепи, если принять в нём заданные ЭДС или напряжения, равными нулю:

$$i(t) = i^*(t) + i^{**}(t). \quad (2)$$

При $t \rightarrow \infty$ ток $i^{**}(t)$ стремится к нулю, так как процесс в цепи, обладающей конечным сопротивлением, должен затухать при отсутствии в цепи источников ЭДС. Поэтому ток $i^{**}(t)$ называют аperiодическим током, т.к. он определяется из уравнений при отсутствии источников ЭДС. Этот ток возникает вследствие того, что при включении или выключении цепи или любом другом внезапном изменении в ней имеющиеся запасы энергии в полях цепи от предыдущего установившегося режима не соответствуют запасам энергии в полях, которые должны были бы быть в новом установившемся режиме после происшедших изменений в цепи.

Исходя из того, что $i^{**}(t)$ стремится к нулю, то ток $i(t)$ стремится к $i^*(t)$, поэтому частное решение $i^*(t)$ является током установившегося режима, который будет протекать в электрической цепи после происшедших изменений.

Однородное уравнение, определяющее аperiodический ток $i^{**}(t)$, имеет вид:

$$L \frac{di^{**}}{dt} + ri^{**} = 0. \tag{3}$$

Его характеристическое уравнение:

$$L\alpha + r = 0 \tag{4}$$

имеет единственный корень $\alpha = -r/L$. Поэтому:

$$i^{**} = Ae^{\alpha t} = Ae^{-\frac{r}{L}t}. \tag{5}$$

Ток переходного процесса рассчитывается как:

$$i = i^* + i^{**} = i^* + Ae^{-\frac{r}{L}t}. \tag{6}$$

Рассмотрим процесс включения цепи на синусоидальное напряжение $u = U_m \sin(\omega t + \psi)$. Ток установившегося режима рассчитывается по выражениям:

$$i^* = \frac{U_m}{z} \sin(\omega t + \psi - \varphi) = I_m \sin(\omega t + \psi - \varphi), \tag{7}$$

$$i = i^* + i^{**} = I_m \sin(\omega t + \psi - \varphi) + Ae^{-\frac{t}{\tau}}, \tag{8}$$

где $z = \sqrt{r^2 + \omega^2 L^2}$, $\varphi = \arctg \frac{\omega L}{r}$ и $\tau = L/r$.

Учитывая, что ток до включения и в первый момент после включения был равен нулю, найдём постоянную A из этого начального условия:

$$0 = I_m \sin(\psi - \varphi) + A.$$

В итоге выражение расчёта тока переходного процесса имеет вид:

$$i = i^* + i^{**} = I_m \sin(\omega t + \psi - \varphi) - I_m \sin(\psi - \varphi) e^{-\frac{t}{\tau}}. \tag{9}$$

При $t = 0$ начальное значение аperiodического тока i^{**} равно и противоположно току i^* , поэтому $i = 0$ (рис. 1). Начальное значение аperiodического тока зависит от начальной фазы ψ напряжения.

Наибольшее начальное значение аperiodического тока, равное I_m установившегося тока, имеет место, если $\psi - \varphi = \pm\pi/2$. Исходя из этого получаем, что минимальное значение аperiodического тока будет при $\psi = \varphi$. Если рассматривать цепь с активно-индуктивной нагрузкой, в которой ток отстаёт от напряжения на угол $\pm\pi/2$, то исходя из вышесказанного, для снижения аperiodической составляющей пускового тока необходимо подключать нагрузку к источнику в моменты максимума питающего синусоидального напряжения, т.е. в моменты достижения мгновенного напряжения амплитудного значения [3, 4].

В итоге для коммутации активно-индуктивной нагрузки необходимо использовать систему точной коммутации, которая будет отслеживать максимумы мгновенного питающего напряжения и коммутировать цепь в эти моменты для снижения аperiodических составляющих пусковых токов.

Результаты исследования. Для реализации такого способа отслеживания была предложена схема (рис. 2), которая на выходе выдаёт прямоугольные импульсы положительной полярности

амплитудой 5 В в моменты достижения напряжения амплитудного значения. В основе схемы использован детектор нуля на компараторе, на выходе которого формируются прямоугольные импульсы длительностью, равной половине периода питающего напряжения [5].

Особенность схемы в том, что если сигнал подаётся на неинвертирующий вход компаратора, то сигнал на выходе длится в течение положительной полуволны питающего напряжения, а если сигнал подавать на инвертирующий вход, то сигнал на выходе длится в течение отрицательной полуволны напряжения.

Для реализации момента появления прямоугольного импульса на выходе компаратора, отличного от нуля, предложена схема таймера задержки [6] (рис. 3), с помощью которого можно сместить время появления прямоугольного импульса, корректируя параметры элементов таймера.

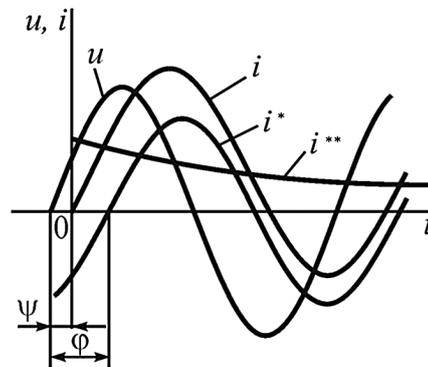


Рис. 1 – Графики изменения параметров активно-индуктивной цепи

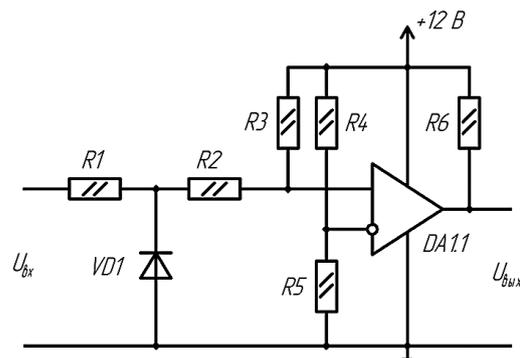


Рис. 2 – Детектор нуля на компараторе

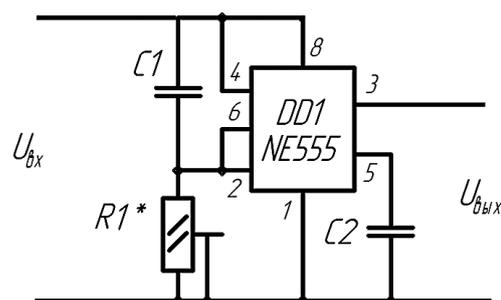


Рис. 3 – Схема таймера задержки импульса

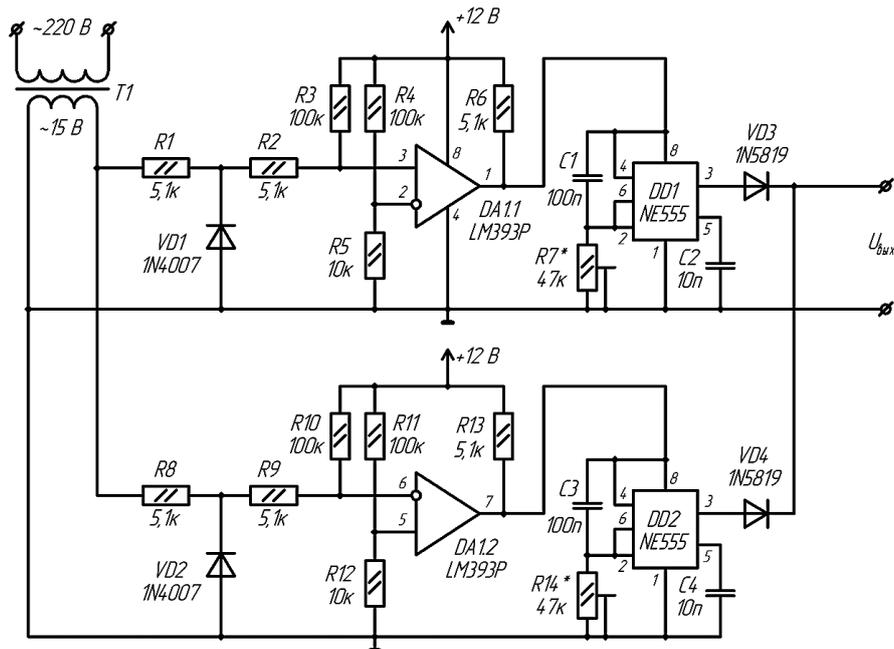


Рис. 4 – Схема детектора максимума мгновенного значения напряжения

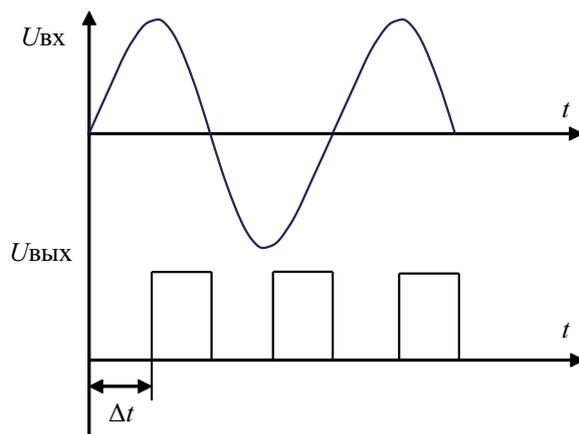


Рис. 5 – Осциллограммы входного и выходного напряжений детектора максимума мгновенного значения напряжения

В результате подбора питающего напряжения схемы, элементов, сопряжённых с компаратором, а также элементов таймера задержки была скомпонована общая схема (рис. 4), на выходе которой появляются прямоугольные импульсы в моменты достижения максимума мгновенного значения питающего напряжения как при положительной, так и отрицательной полуволне с задержкой по

времени Δt от момента перехода мгновенного напряжения через ноль (рис. 5).

Выводы. Разработанная схема детектора максимального значения мгновенного напряжения, формируя импульсы, которые возможно подавать в микроконтроллер, может использоваться как дополнение к системе управления коммутацией активно-индуктивной нагрузки. Используя импульсы со схемы возможно скорректировать момент коммутации нагрузки и снизить аперийную составляющую пускового тока.

Литература

1. Смирнов Ю.А., Соколов С.В., Титов Е.В. Физические основы электроники: учебное пособие. 2-е изд., испр. СПб.: Лань, 2013.
2. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Теоретические основы электротехники. Л.: Энергия, 1967.
3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М.: Высшая школа, 1996.
4. Костенко М.П. Электрические машины. В 2-х част. Ч. 1 – Машины постоянного тока. Трансформаторы. Л.: Энергия, 1972.
5. Волович Г.И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2005.
6. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. 12-е изд. Т. I / пер. с нем. М.: ДМК Пресс, 2008.

Владимир Валерьевич Пугачёв, старший преподаватель. ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный аграрный университет». Россия, 460014, г. Оренбург, ул. Челюскинцев, 18, pvv056@list.ru

Салават Вагимович Акчурин, кандидат технических наук, доцент. ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет». Россия, 450001, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, 34, akchurin.sw@yandex.ru

Vladimir V. Pugachev, senior lecturer. Orenburg State Agrarian University. 18, Chelyuskintsev St., Orenburg, 460014, Russia, pvv056@list.ru

Salavat V. Akchurin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. Bashkir State Agrarian University. 34, 50-let October St., Ufa, Republic of Bashkortostan, 450001, Russia, akchurin.sw@yandex.ru