

## МЕТОД УМЕНЬШЕНИЯ СИЛЫ ТОКА ВКЛЮЧЕНИЯ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

**Аннотация:** При включении трансформатора возникает пусковой ток, превышающий номинальный ток трансформатора в 10 и более раз, что может привести к провалам напряжения, это нарушает электромагнитную совместимость электроприёмников и расстройство в работе электронных схем и релейной защиты. Большой ток может так же вызвать повреждение обмотки трансформатора из за появления больших электродинамических сил. Данной проблеме посвящено много патентов на изобретение и научных статей излагающих мероприятия снижения пусковых токов [1-9].

**Ключевые слова:** трансформатор, ток включения трансформатора (пусковой ток), напряжение, индуктивность, магнитная проницаемость, ферромагнитный сердечник.

*Рассмотрим кратко результаты исследований в литературных источниках.*

При включении силового трансформатора в сеть (даже ненагруженного) возникает всплеск тока [1], который может превышать номинальный ток во много раз. Наиболее эффективным способом уменьшения пускового тока является обеспечение подключения силового трансформатора к питающей сети в момент достижения максимального мгновенного значения напряжения, то есть при  $\varphi = \pi/2$ . (Как это сделать на практике для трёх фаз?)

В статье [2] рассматриваются методика и некоторые результаты компьютерных расчетов бросков тока намагничивания трехфазного трехстержневого трансформатора. Более достоверными для исследования коммутационных режимов силовых трансформаторов, в том числе для расчета бросков тока намагничивания, являются математические модели, построенные на базе близкой к реальности физической картины распределения магнитных потоков в элементах магнитопровода и между обмоточных пространствах.

Целью работы [3] является разработка и реализация способов действия дифференциальной защиты силового трансформатора с повышенной устойчивостью функционирования на основе выявленных устойчивых признаков внешних и внутренних повреждений, нормальных и аномальных режимов работы силового трансформатора.

Разработано [4] электронное устройство типа УСВ-35/1 реализующее способ снижения пускового тока трансформатора. Опыт эксплуатации их показал хорошие результаты.

Значение бросков тока снизилось с 7,5 кА до 1.3 кА. Внедрено в производство.

Формула изобретения [5]. Способ уменьшения пускового тока силового трансформатора, включающий замыкание контактов выключателя при подключении трансформатора к сети в момент достижения максимального мгновенного значения напряжения в фазе  $90^\circ$ , отличающийся тем, что предварительно перед замыканием контактов выключателя при подключении трансформатора к сети осуществляют полное размагничивание магнитопровода трансформатора. К недостаткам известного устройства с тиристорным управляемым подключением трехфазного силового трансформатора к трехфазной сети следует отнести сложность и сравнительно низкую эксплуатационную надежность.



Выводы [6]. В ходе математического анализа переходного процесса при включении однофазного стержневого трансформатора было получено выражение, описывающее зависимость благоприятного момента включения, определяемого фазой напряжения сети  $\psi$ , от величины и полярности остаточного магнитного потока в стали сердечника трансформатора. Однако, анализ и расчет переходных процессов при включении трехфазных трансформаторов является более сложным за счет наличия фазового сдвига между напряжениями, прикладываемыми к обмоткам.

Токи включения силовых трансформаторов [7] на холостой ход в сотни и тысячи раз больше тока в установившемся режиме, они могут быть на порядок больше номинального тока и обычно сравнимы с ударным током короткого замыкания (КЗ). При этом произойдут ложные срабатывания защиты и отключение от сети только что включённого трансформатора.

Устройство для включения силового трансформатора [8]. Реферат: Изобретение относится к электротехнике, в частности к системам энергоснабжения, и может быть использовано в трансформаторных подстанциях для включения силового трансформатора под нагрузкой. В качестве полупроводникового преобразователя применен трехфазный мостовой диодный выпрямитель, в цепь постоянного тока которого включен реактор, а трехфазный контактор выполнен по схеме трехфазного короткозамыкателя, причем зажимы переменного тока трехфазного мостового диодного выпрямителя и зажимы механических контактов трехфазного короткозамыкателя объединены и включены в расщепку звезды первичной обмотки силового трансформатора. Применение предлагаемого устройства позволяет снизить пусковой ток примерно в 2 раза.

Устройство включения трехфазного трансформатора [9]. Российский патент 2017 года по МПК H02M1/16 . Описание патента на изобретение RU2621704C1.

Изобретение относится к электротехнике, в частности к силовым трансформаторам среднего напряжения, и может быть использовано для ограничения пусковых токов при включении их на холостой ход. Технический результат достигается тем, что в устройстве включения трехфазного трансформатора, содержащем выключатель, соединенный главными цепями с фазами питающей сети и обмотками трансформатора, пусковые резисторы и нагрузку. Выключатель выполнен с входом управления. Введены, логические элементы "3И", "2И", первый и второй RS-триггеры, элемент временной задержки и таймер с входами "Пуск" и "Сброс".

**Таким образом** пусковой ток может привести к провалам напряжения, что нарушает электромагнитную совместимость электроприёмников и расстройство в работе электронных схем и релейной защиты. Непонятно как можно включить одним контактором три фазы при  $\varphi = \pi/2$ . Наиболее ценным является изобретение [8] позволяющее снизить пусковой ток примерно в 2 раза, а также устройство включения трехфазного трансформатора [9] с пусковыми резисторами. В других случаях при одновременном включении трёх фаз в одной из них пусковой ток значительно больше [4].

**В данной работе предлагается** производить пуск с помощью симисторов с последующим включением контактора или вакуумного выключателя через 10 секунд. При этом пусковой ток приближён в 10 раз меньше. Симисторы в каждой фазе управляются системой импульсно фазового управления (СИФУ).

Рассмотрим причину большого пускового тока обмотки трансформатора.

Потокоцепление обмотки:

$$\psi = \Phi w, \text{ Вб,}$$

где  $w$  – число витков обмотки,  $\Phi$  – магнитный поток.



Индуктивность обмотки:

$$L = \frac{\Psi}{I}, \text{ Гн} \quad (1)$$

$$L = \frac{\Phi w}{I} = \frac{I w}{R_M} \cdot \frac{w}{I} = \frac{w^2}{R_M}, \quad (2)$$

где  $R_M$  – магнитное сопротивление с учётом воздушного зазора.

Магнитное сопротивление и магнитная проводимость зазора:

$$R_{M\delta} = \frac{\delta}{\mu_0 S}, \quad G_{M\delta} = \frac{\mu_0 S}{\delta},$$

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ , Гн/м – магнитная проницаемость зазора

Из последних формул видно, что при любом зазоре  $\delta$  и площади  $S$  без магнитопровода величина  $R_M$  – магнитное сопротивление с учётом воздушного зазора велика. При этом индуктивность  $L$  и индуктивное сопротивление  $X_L = \omega L$  имеют малое значение. Этим объясняется большой пусковой ток, так как магнитная цепь ещё не включилась в работу.

Предлагается следующая схема включения (рис. 1)

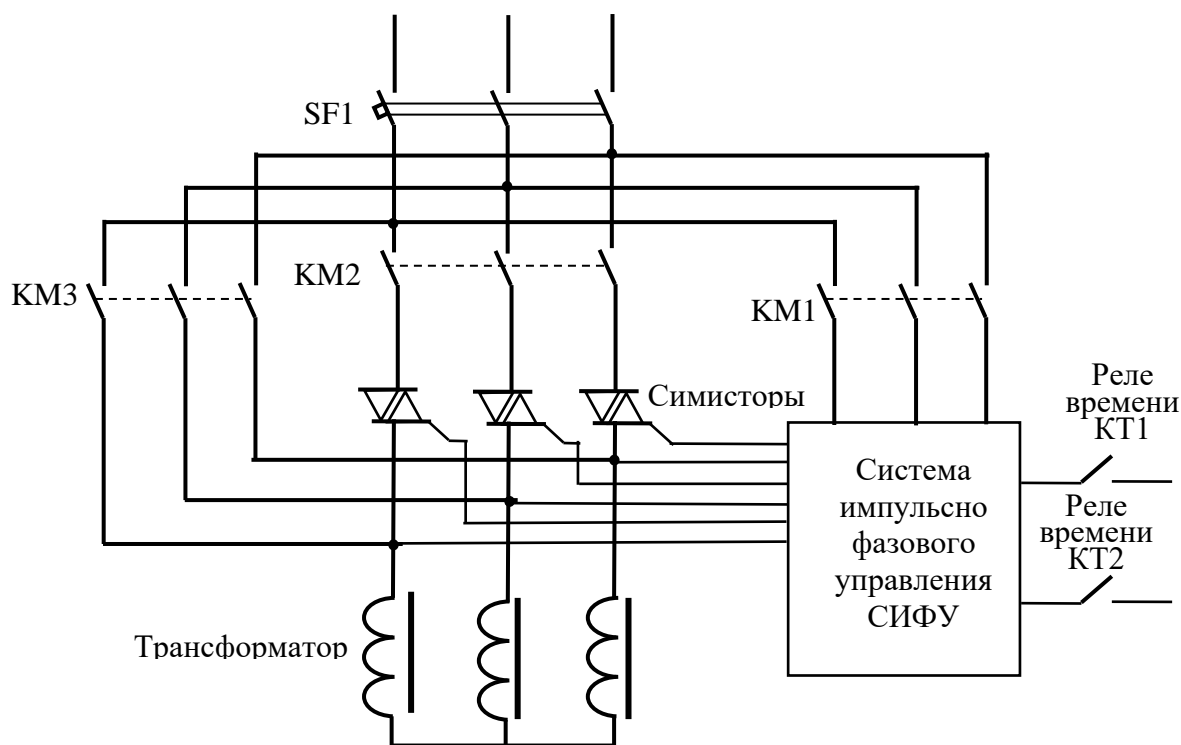


Рис.1

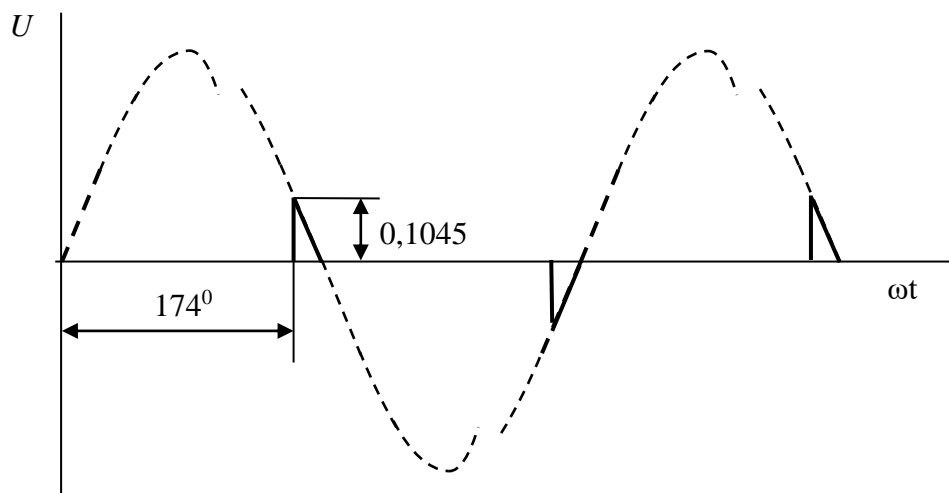
Упрощенная схема включения

Включается автомат SF1, нажимается кнопка включения блоков питания СИФУ. Включается KM1 (СИФУ) в каждой фазе, затем производится включение KM2 (симисторы) и одновременно KT1 (реле времени). В СИФУ установлен угол открывания симисторов равный



174° за счёт установленного напряжения смещения СИФУ. До момента срабатывания КТ1 (выдержка времени 1,0 секунда) на трансформатор подаётся напряжение показанное на рис. 2

Очевидно, что амплитуда импульсов напряжения в 10 раз меньше амплитуды синусоиды при этом пусковой ток будет невелик. В течение 1,0 секунды будет подано 50 импульсов, магнитопровод включится в работу, уменьшится магнитное сопротивление, увеличится индуктивность (2), уменьшится сила тока.

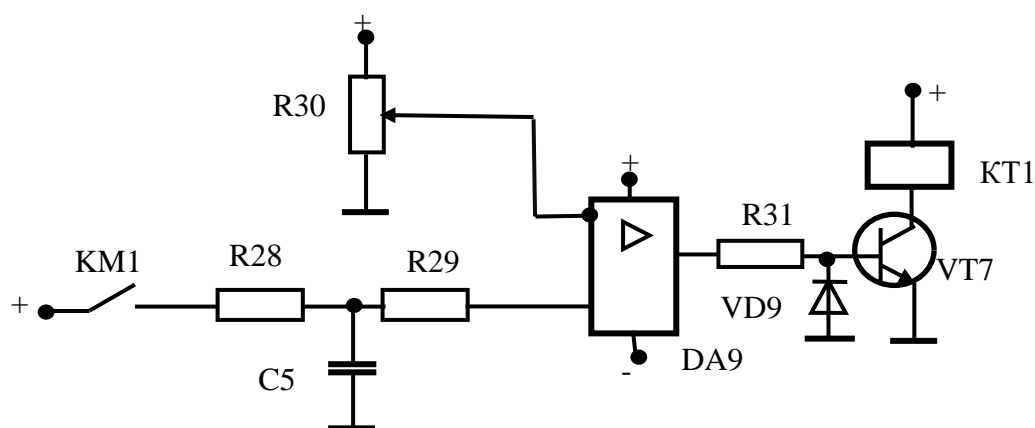


Р и с. 2  
Действительные графики напряжений

Выдержка времени у реле (рис. 3) устанавливается выбором величин  $R28$ ,  $C5$  исходя из условия, что время заряда конденсатора до величины напряжения источника равно:

$$t_3 = R \cdot C$$

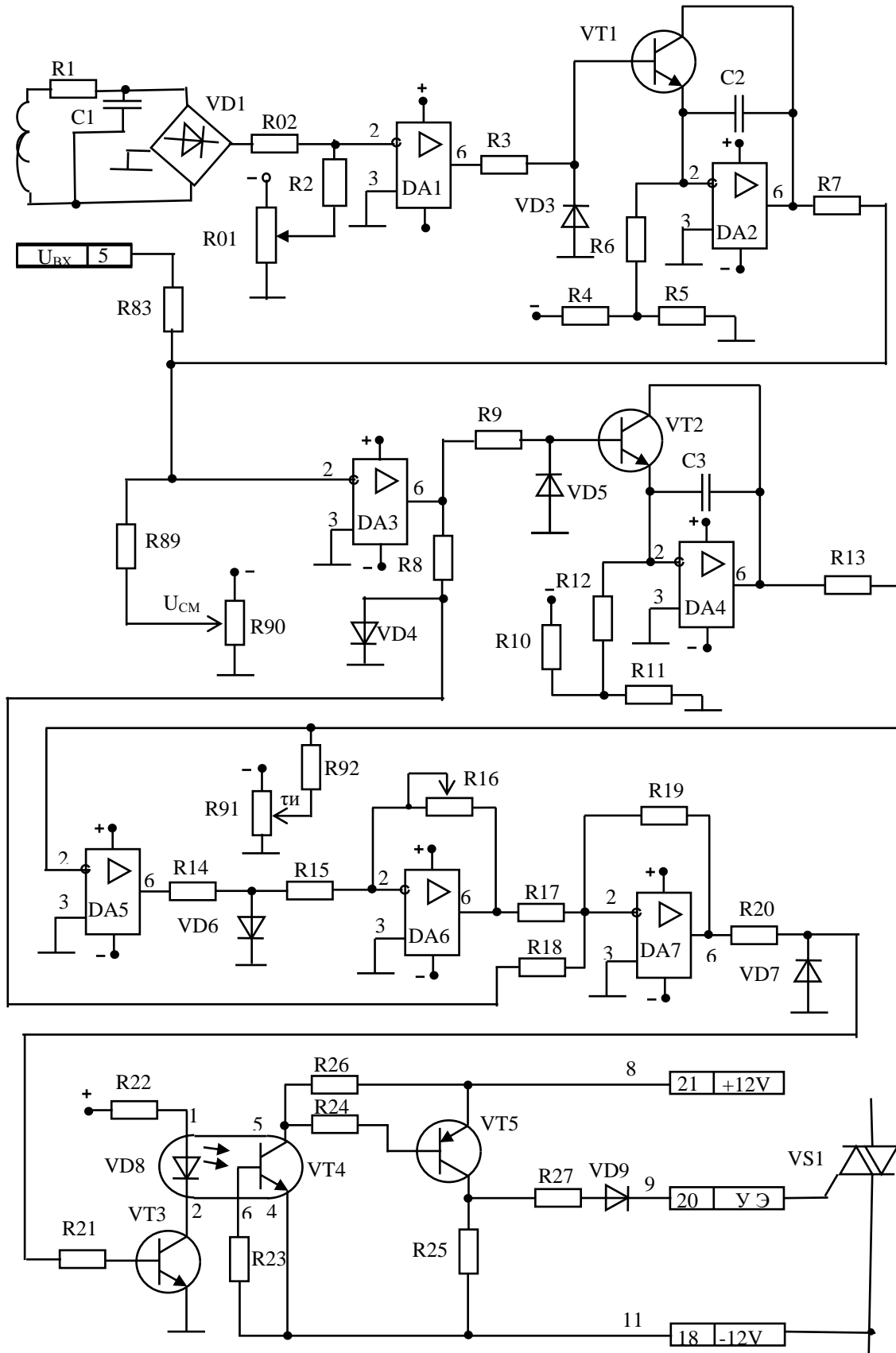
Если напряжение срабатывания с  $R30$  принято, например 7,5 В, напряжение источника 15,0 В, заданная выдержка времени 1,0 с, то надо принять произведение  $t_3 = R \cdot C = 2$  секунды.



Р и с. 3  
Реле времени КТ1 (1.0 с)







Р и с. 5

Схема СИФУ с регулируемой длительностью импульсов



Переменное напряжение на выходе компаратора  $DA1$  прямоугольной формы с помощью  $R3$ ,  $VD3$ , преобразуется в однополярные положительные импульсы. Эти импульсы длительностью  $174^\circ$  поступают на базу  $VT1$ , который включен в цепь обратной связи интегратора, выполненного на  $DA2$ .

Этот интегратор называют генератором пилообразного или опорного напряжения. Когда  $VT1$  открыт, то он шунтирует цепь обратной связи  $DA2$  и на его выходе будет нулевое напряжение. За счёт отрицательного смещения с  $R01$  при окончании полупериода при  $180^\circ$  транзистор  $VT1$  кратковременно открывается.

Затем  $VT1$  закрывается и на выходе  $DA2$  будет линейно возрастающее напряжение положительной полярности. Скорость нарастания зависит от величины емкости  $C2$ , величины резистора  $R6$  и величины отрицательного напряжения с делителя  $R4$ ,  $R5$ . Пилообразное напряжение подается на вход компаратора  $DA3$  (нуль-орган), где оно сравнивается с напряжением смещения  $U_{см}$  с  $R90$  и с напряжением  $U_{вх}$  на входе СИФУ.

Величиной  $U_{см}$  устанавливается начальный угол открывания тиристоров, равный  $174^\circ$ , при  $U_{вх}=0$ . Увеличение  $U_{вх}$  приводит к изменению моментов переключения нуль-органа  $DA3$ .

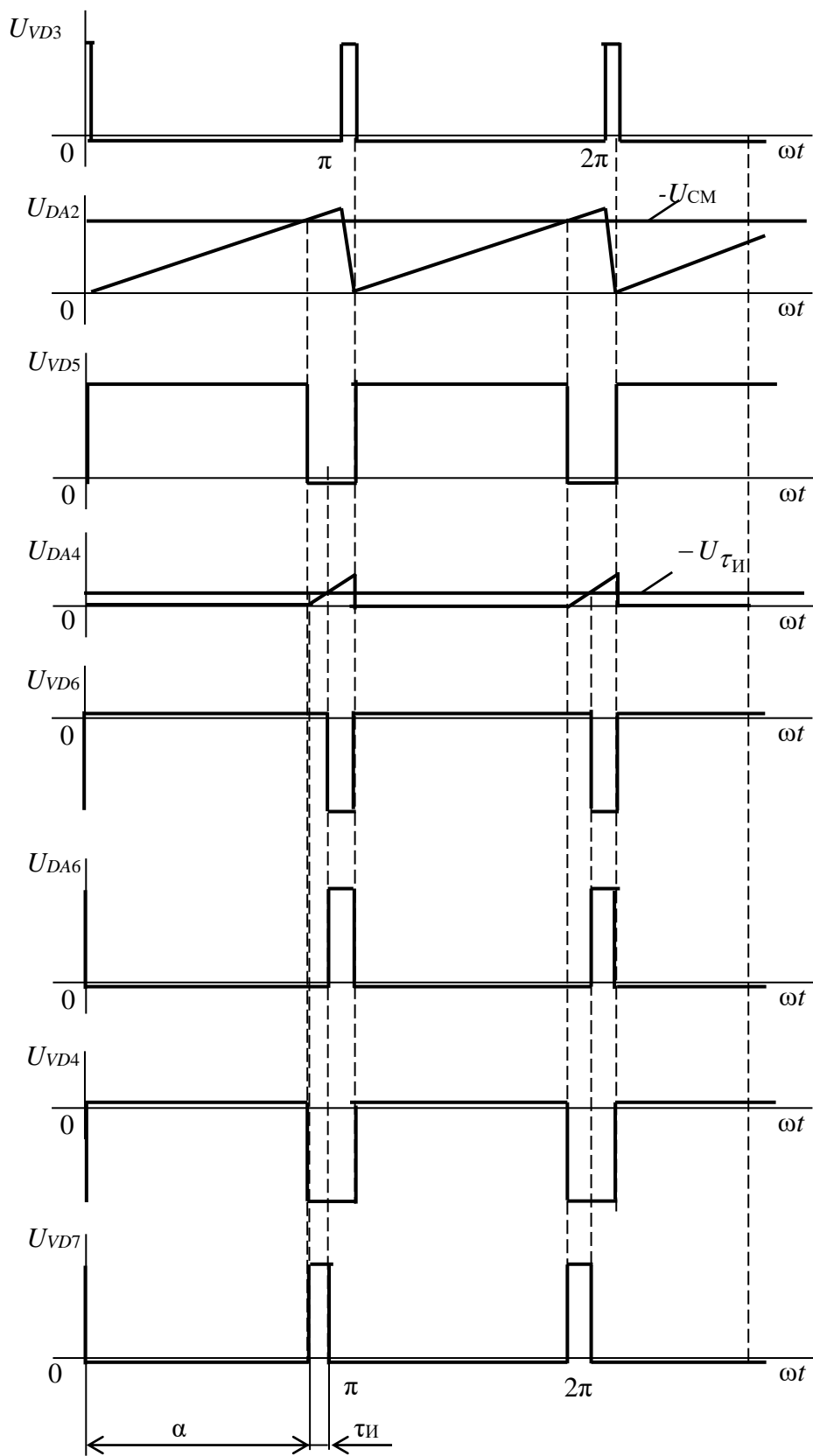
На выходе  $DA3$ , при  $U_{вх}>0$ , будут разнополярные прямоугольные импульсы. Эти импульсы цепью  $R9$ ,  $VD5$  преобразуются в однополярные положительные, а цепью  $R8$ ,  $VD4$  в однополярные отрицательные.

С  $VD5$  импульсы поступают на базу транзистора  $VT2$ , включенного в цепь обратной связи второго генератора пилообразного напряжения, выполненного на  $DA4$ , который предназначен для формирования длительности импульсов.

Пилообразное напряжение с  $DA4$  сравнивается с напряжением с  $R91$  на входе компаратора  $DA5$ . Напряжение с  $DA5$  преобразуется цепью  $R14$ ,  $VD6$  в отрицательные прямоугольные импульсы, которые инвертируются усилителем  $DA6$ .

С помощью  $R16$  может регулироваться амплитуда импульсов. Импульсы с  $DA6$  суммируются (вычитаются) с импульсами с  $VD4$  на входе  $DA7$ . В результате на выходе  $DA7$ , получаем импульсы необходимой длительности, после  $R20$ ,  $VD7$ , положительной полярности. Затем эти импульсы, после гальванической развязки  $VD8$ ,  $VT3$ , усиливаются по мощности транзистором  $VT5$  и подаются на управляющий электрод симистора. Графики напряжений поясняющие работу СИФУ приведены на рис. 6.

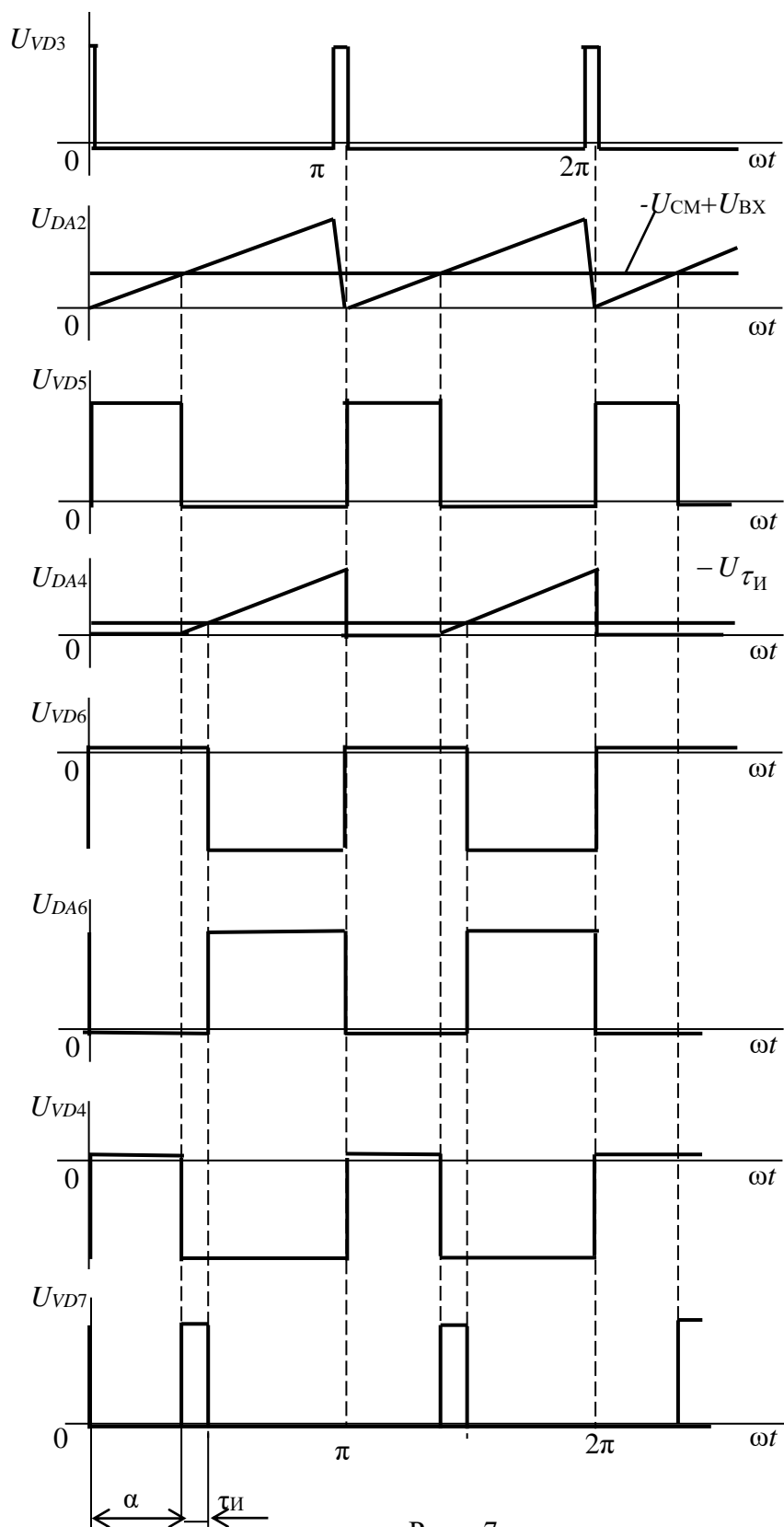




Р и с. 6  
Диаграмма напряжений СИФУ с регулируемой  
длительностью импульсов при  $U_{\text{ВХ}}=0$







Р и с. 7  
Диаграмма напряжений СИФУ с регулируемой  
длительностью импульсов при  $U_{ВХ} > 0$



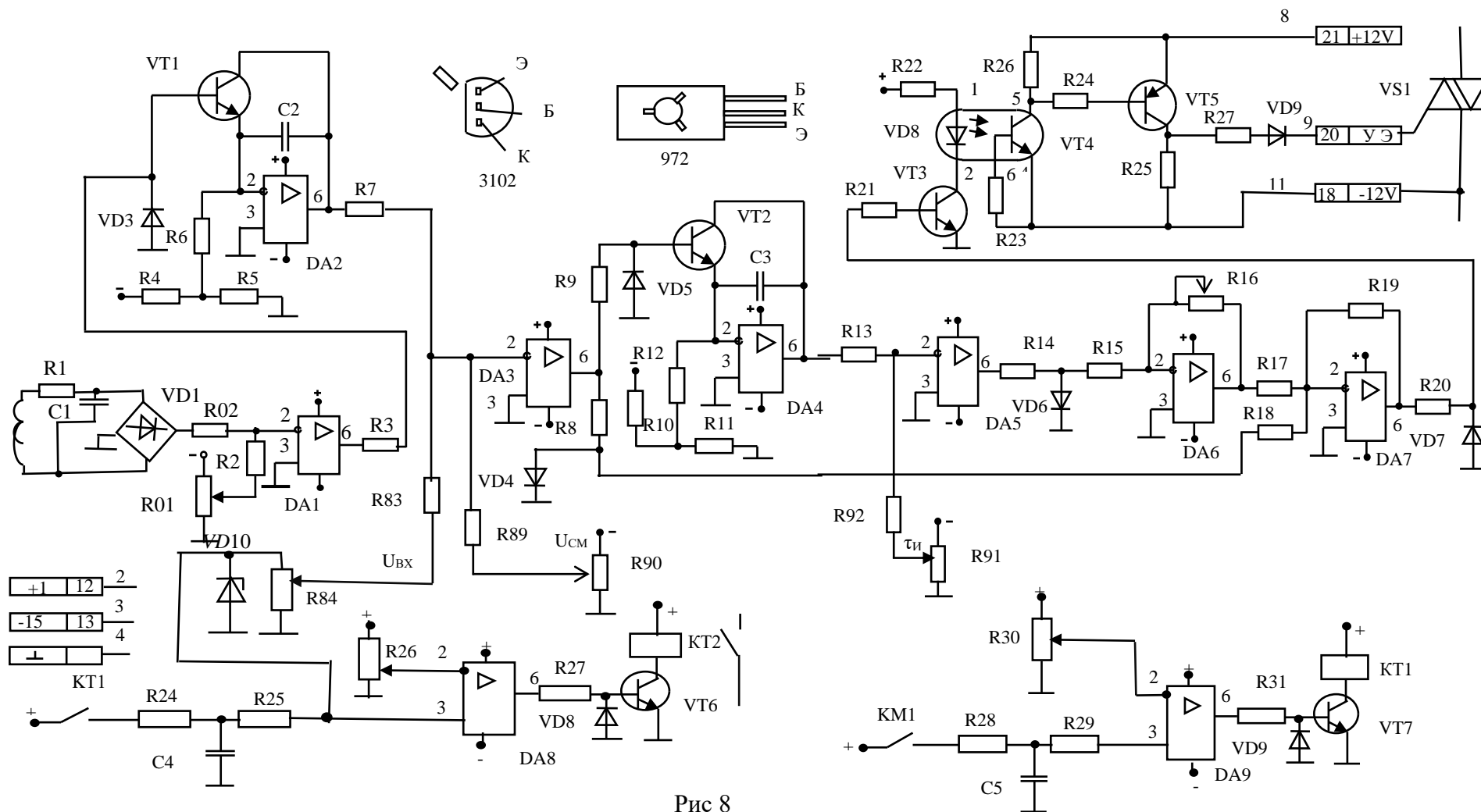


Рис 8  
 Полная схема в уменьшенном масштабе



**Вывод.**

Таким образом синхронная одновременная работа СИФУ в каждой фазе позволяет производить с помощью симисторов плавное включение трансформатора без больших пусковых токов в течение 10 секунд, затем включается контактор и отключаются симисторы. Возможно вместо симисторов применять встречно параллельное включение тиристоров, однако при этом необходима на каждый тиристор своя СИФУ. Очевидно, что этот метод может применяться при плавном пуске асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором без больших пусковых токов, с увеличенной выдержкой времени реле КТ2.

*Список литературы:*

1. Евсеев Андрей, Котенёв Сергей, Переходные процессы при включении силового трансформатора в сеть с синусоидальным напряжением. Силовая электроника №4,2005, PDF версия.

2. Докт. техн. наук, проф. Новашв. И. , асп. Томкевич А. П. Броски тока намагничивания трехфазных силовых трансформаторов при неполнофазном включении  
*Белорусский национальный технический университет*

3. Литвинов Илья Игоревич. Повышение устойчивости функционирования дифференциальной защиты силового трансформатора. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент Глазырин Владимир Евлампиевич. Новосибирский государственный технический университет.

4. Снижение тока включения трансформатора. В. А. Кузьменко, А. И. Лурье, кандидаты технических наук, А. И. Панибратец, В. С. Чуприков, к.т.н. (статья в интернете).

5. Способ снижения токов включения при многократных коммутациях трансформатора. Авторы: Кузьменко В.А., Лейтес Л.В. Лозовский Н.А. Лурье А.И. Панибратец А.Н. Пиндак И.А. Рабинович В.Л. Чуприков В.С. Авторское свидетельство. Опубликовано: 1997.10.20

6 Халина Т.М., Овсепян В.А., Богоутдинов Е.Р. Анализ возникновения бросков магнитного потока и намагничивающего тока при включении трансформатора на холостом ходу. УДК 621.313-57, *АлтГТУ им. И.И. Ползунова, г. Барнаул.*

*Энергетические системы, 2022, № 1, 000*

7. Лурье А.И. Намагничивающий ток (ток включения) трансформаторов, стойкость при токах включения // Электродинамическая стойкость трансформаторов и реакторов при коротких замыканиях. М.: Изд-во Знак, 2005. С. 290-309.

8. Климаш Владимир Степанович (RU), Ниматов Рустам Рамазанович (RU). Устройство для включения силового трансформатора. ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ. Опубликовано: 26.02.2020 Бюл. № 6

9. Вишневецкий Владимир Ильич, Паймурзов Евгений Геннадиевич, Пименов Виктор Михайлович, Макаров Сергей Геннадиевич. УСТРОЙСТВО ВКЛЮЧЕНИЯ ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА. Российский патент 2017 года по МПК.

