

UDC 621.314

**ANALYSIS OF ELECTRICAL VOLTAGE STABILIZERS AND METHODS
FOR IMPROVING VOLTAGE STABILIZATION**

Erkin Uljaev¹

Doctor of Technical Sciences, Professor

ORCID: 0000-0001-9614-3724

Tashkent State Technical University named after Islam Karimov

Uzbekistan, Tashkent

Nosirov Kh.M.

Master's student

ORCID: 0009-0001-7008-1462

Tashkent State Technical University named after Islam Karimov

Uzbekistan, Tashkent

**АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАБИЛИЗАТОРОВ И СПОСОБЫ
ПОВЫШЕНИЯ СТАБИЛИЗАЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ.**

Улжаев Эркин¹

д.т.н., профессор

ORCID: 0000-0001-9614-3724

Ташкентский государственный технический университет имени Ислама

Каримова

Республика Узбекистан, г. Ташкент

Носиров Х.М.

магистрант

ORCID: 0009-0001-7008-1462

Ташкентский государственный технический университет имени Ислама

Каримова

Республика Узбекистан, г. Ташкент

АННОТАЦИЯ

В результате проведённого анализа установлено, что стабилизация напряжения является ключевым элементом обеспечения надёжной и устойчивой

работы электронных устройств и энергетических систем. В работе проведён сопоставительный анализ известных стабилизаторов напряжения, выявлены их достоинства и недостатки. Установлено, что современные стабилизаторы напряжения реализуются на основе различных принципов и схемных решений, каждое из которых обладает своими особенностями, преимуществами и ограничениями.

Ключевые слова: стабилизатор напряжения, линейный стабилизатор, релейный стабилизатор, позиционные стабилизаторы, электронно-электромеханические, адаптивные стабилизаторы напряжения.

ABSTRACT

As a result of the analysis, it was found that voltage stabilization is a key element in ensuring the reliable and stable operation of electronic devices and energy systems. A comparative analysis of known voltage stabilizers was carried out, and their advantages and disadvantages were identified. It was established that modern voltage stabilizers are based on various principles and circuit designs, each of which has its own characteristics, advantages, and limitations.

Keywords: voltage stabilizer, linear stabilizer, relay stabilizer, positional stabilizers, electronic-electromechanical stabilizers, adaptive voltage stabilizers

ВВЕДЕНИЕ: К настоящему времени разработаны различные методы и схемы стабилизации напряжения.

Основными типами стабилизаторов напряжения являются: релейные, электронные и электромеханические стабилизаторы. Стабилизаторы, построенные на основе этих типов стабилизации, могут быть реализованы с использованием релейных элементов, сервомоторов, тиристоров и инверторов, а также адаптивной системы управления стабилизатором напряжения с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ).

Преимуществом релейного стабилизатора является простота конструкции и низкая стоимость. Он работает на основе простого пропорционального закона регулирования, учитывающего достижение верхнего или нижнего уровня сетевого напряжения относительно установленного порогового значения (Рис. 1).

Недостатками релейного стабилизатора напряжения являются большой шум на контактах; через определённое число срабатываний образуется перегрев (нагар), появляются искры на контактах, что приводит к неустойчивой работе стабилизатора напряжения.

Сервомоторные стабилизаторы построены на основе регулируемого тороидального трансформатора (рис.). Преимуществом сервомоторного стабилизатора является обеспечение плавного регулирования напряжения, его недостатками являются ограниченный диапазон регулирования выходного напряжения и большие габариты.

Тиристорные стабилизаторы построены на основе бесконтактных автоматических электронных схем, обеспечивающих высокую надёжность и бесшумную работу преобразователя. Принцип работы тиристорного преобразователя похож на принцип работы релейного элемента и основан на пропорциональном законе регулирования. Выходное стабилизированное напряжение значительно более гладкое, чем выходное напряжение стабилизатора, построенного на релейном элементе (Рис. 2).

Недостатком тиристорного стабилизатора напряжения является зависимость выходного стабилизированного напряжения и его мощности от типов применяемых тиристоров.

В инверторных стабилизаторах используются инверторы для регулирования напряжения, что обеспечивает более точное регулирование.

Адаптивная система управления стабилизатором напряжения с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) является современной системой автоматического регулирования, в которой выходное напряжение стабилизируется за счёт изменения длительности (ширины) импульсов управления силовым ключом.

Принципы работы основных типов стабилизаторов напряжения и их принципиальные электрические схемы.

Схема работы релейного стабилизатора

Двухпозиционные регуляторы. Выходная величина регулятора может принимать только два значения: минимума и максимума. Статические характеристики: допустим, что текущее значение y регулируемой величины меньше заданного $y_{зд}$, т.е. $\varepsilon > 0$, тогда выходная величина u регулятора принимает максимум значение u_{max} . Если $\varepsilon < 0$, то u_{min} . Выходная величина идеального регулятора переходит от одного значения к другому скачком при прохождении текущего значения регулируемой величины через заданное значение. Регулятор с зоной неоднозначности (рис. б) выходная величина u изменяется от минимума до максимума значения при $y = y_{зд} - b$ или $\varepsilon = +b$ и от максимума до минимума значения при $y = y_{зд} + b$ или $\varepsilon = -b$.

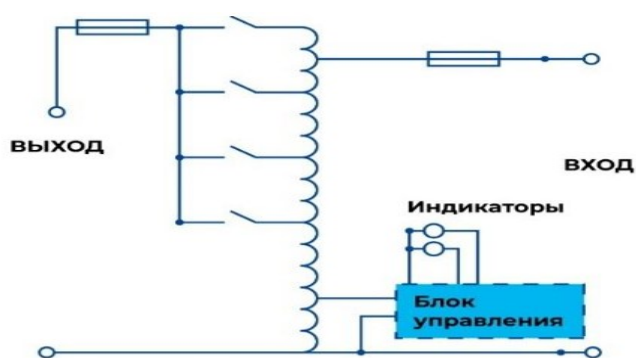


Рис.1. Принцип построения релейного способа регулирования напряжения стабилизатора

Схема работы релейного стабилизатора напряжения (рис. 1) основана на ступенчатом регулировании напряжения путём автоматической коммутации секций вторичной обмотки трансформатора. Коммутация секций обмоток осуществляется с помощью силовых реле, работой которых управляет электронная плата. Специальный процессор контролирует входное и выходное напряжение, вычисляет необходимый коэффициент трансформации и осуществляет коммутацию требуемого числа силовых реле. Такая схема стабилизатора позволяет быстро и эффективно стабилизировать напряжение в заданном диапазоне.

Предварительным критерием выбора структуры системы регулирования и закона действия регулятора может служить величина отношения времени запаздывания объекта и постоянной времени объекта:

$\tau_{зап}/T_o$. для нейтральных объектов вместо T_o подставляют T_a . при соотношении $\tau_{зап}/T_o < 0$ удовлетворительное качество регулирования можно получить, используя однократную систему регулирования.

В зависимости от величины этого отношения можно предварительно выбрать закон действия регулятора:

1. При соотношении $\tau_{зап}/T_o < 0,2$ и небольших изменениях нагрузки целесообразно использовать регулятор релейного действия;
2. При соотношении $\tau_{зап}/T_o > 0,2$ лучшее качество регулирования обеспечивают регуляторы непрерывного действия, причем с ростом соотношения $\tau_{зап}/T_o$ для обеспечения требуемого качества регулирования необходимо выбирать более сложные законы регулирования (П→ПИ→ПИД).

Если $\tau_{зап}/T_o > 1$, то при использовании одноконтурной системы регулирования ни один из линейных законов регулирования не дает удовлетворительного качества регулирования. Тогда необходимо использовать многоконтурные системы регулирования.

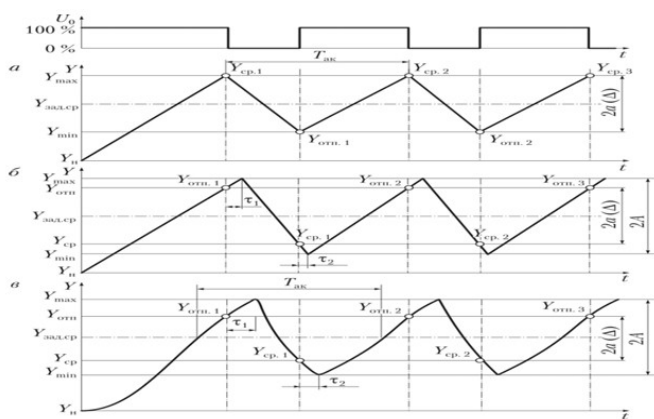


Рис.2. Принцип изменения выходного стабилизируемого напряжения, в зависимости от заданных пороговых величин релейного регулятора напряжения.

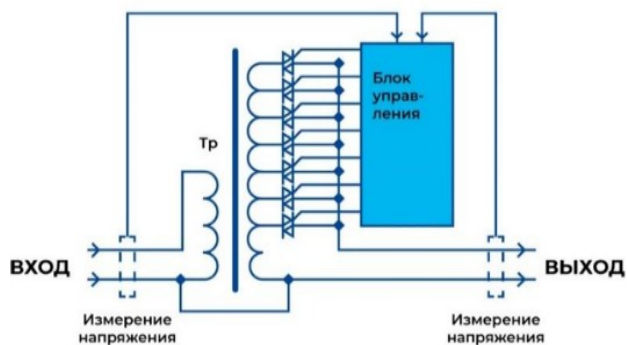


Рис.3. Схема работы электронного стабилизатора напряжения

На рис.2. приведена принцип изменения выходного стабилизируемого напряжения, в зависимости от заданных пороговых величин релейного регулятора напряжения.

Схема работы электронного стабилизатора напряжения (Рис. 3) основана на ступенчатом регулировании напряжения путём автоматической коммутации секций вторичной обмотки трансформатора. Коммутация секций обмоток осуществляется с помощью силовых тиристоров, работой которых управляет электронный блок управления. Выходное напряжение стабилизатора при использовании схемы вольтодобавочного типа определяется суммированием основного и добавочного напряжений. Такая схема стабилизатора позволяет быстро и эффективно стабилизировать напряжение в заданном диапазоне, обеспечивая высокую надёжность и бесшумность работы.

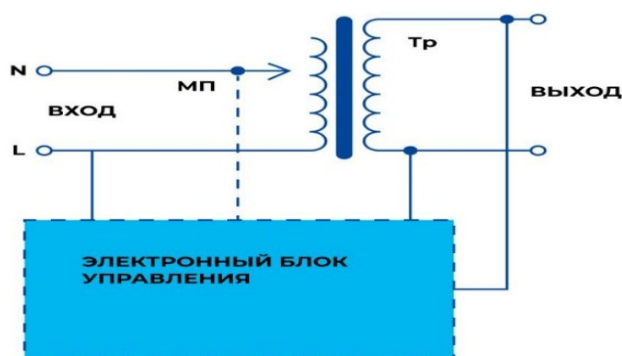


Рис.4. Принцип построения электромеханического стабилизатора напряжения

Принцип построения и работы электромеханического стабилизатора напряжения (Рис. 4) основан на плавном регулировании напряжения путём автоматического изменения числа витков вторичной обмотки трансформатора. Коммутация дополнительных витков трансформатора осуществляется с помощью подвижного контакта, приводимого в движение сервоприводом. Положением подвижного контакта управляет электронный или аналоговый блок управления. При отклонении входного напряжения от установленного значения блок управления подаёт команду на перемещение подвижного контакта до момента установления требуемого выходного напряжения.

Достоинством данной схемы стабилизации является возможность плавного и точного регулирования напряжения. Однако время стабилизации напряжения в таких стабилизаторах достаточно велико. Существенным недостатком стабилизаторов, построенных по данной схеме, является физический износ подвижного контакта, что ограничивает область их применения.

Методы выбора закона регулирования стабилизатора напряжения

Выбор типа стабилизатора напряжения определяется спецификой решаемой задачи. Принципы построения схем стабилизаторов напряжения определяют их основные параметры. Наиболее важными параметрами стабилизаторов являются: точность стабилизации, скорость стабилизации, надёжность работы, защита от электрических помех, срок эксплуатации, стоимость и габариты стабилизатора.

Анализ работы вышеприведённых методов и схем стабилизации напряжения показал, что они имеют существенные недостатки. В связи с этим возникает необходимость применения современных методов стабилизации, например адаптивного способа стабилизации.

МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ: В основе адаптивной системы лежит принцип широтно-импульсной модуляции (ШИМ), при котором регулируется не амплитуда сигнала, а скважность импульсов (отношение времени включения к периоду). При этом включение и выключение силового элемента (транзистора) осуществляется с высокой частотой. Среднее значение выходного напряжения зависит от ширины импульсов, то есть определяется площадью импульса (S).

- Адаптивная система отличается тем, что она:
- автоматически подстраивает параметры регулирования;
- учитывает изменения нагрузки, входного напряжения, температуры и внешних возмущений;
- изменяет коэффициенты регулятора (например, ПИД-регулятора) в реальном времени.

Структура адаптивного устройства состоит из следующих элементов (блоков): источника питания ($U_{вх}$); силового ключа (MOSFET/IGBT),

управляемая ШИМ-сигналом и регулирует подачу энергии; LC-фильтр, сглаживающий импульсное напряжение в постоянное; датчика напряжения, измеряющий выходное напряжение $U_{\text{вых}}$; АЦП/усилитель преобразует сигнал для обработки контроллером. Контроллер является адаптивным регулятором, реализующий алгоритм ПИД регулирования, адаптацию коэффициентов, компенсацию возмущений. ШИМ-модуль формирует сигнал с регулируемой скважностью:

$$D = \frac{t_{\text{имп}}}{T} \quad (1)$$

Преимуществом адаптивной системы стабилизации является: высокая точность стабилизации; быстрый отклик на изменения нагрузки; высокий КПД (за счёт ключевого режима работы); устойчивость к помехам и неустойчивости входа; возможность интеллектуального управления. Более подробные данные приведем в следующих статьях.

Принцип работы: измеряется текущее выходное напряжение $U_{\text{вых}}$, которое сравнивается с заданным $U_{\text{зад}}$ значением и определяется ошибка:

$$e(t) = U_{\text{зад}} - U_{\text{вых}} \quad (2)$$

Контроллер: изменяет коэффициенты (адаптации), рассчитывает управляющее воздействие, ШИМ изменяет скважность D , через силовой ключ регулируется энергия и проводится стабилизация напряжения.

Адаптивный блок: автоматически подстраивает параметры регулятора, учитывает: изменение нагрузки, колебания входного напряжения и нелинейности системы.

Анализ. Адаптивная ШИМ-система позволяет: повысить точность стабилизации, улучшить динамические свойства устройства, снизить перерегулирование, обеспечить устойчивость при изменениях условий эксплуатации.

Заключение

В результате проведённого анализа установлено, что стабилизация напряжения является ключевым элементом обеспечения надёжной и устойчивой

работы электронных устройств и энергетических систем. Современные стабилизаторы напряжения реализуются на основе различных принципов и схемных решений, каждое из которых обладает своими особенностями, преимуществами и ограничениями.

Выбор конкретного способа и схемы стабилизации определяется требованиями к системе: уровнем допустимых пульсаций, диапазоном входного напряжения, мощностью нагрузки, КПД и условиями эксплуатации. В перспективе развитие стабилизаторов напряжения связано с внедрением интеллектуальных систем управления, повышением энергоэффективности и миниатюризацией электронных компонентов, что открывает новые возможности для их применения в различных областях техники и промышленности.

Литература

1. Arbetter B., Maksimovic D. Feedforward pulse width modulators for switching power converters // IEEE Transactions on Power Electronics. – 1997.
2. Babaie M., Al-Haddad K. Intelligent harmonic suppressor by adaptive fuzzy controller for PEC9 inverter under unknown nonlinear loads // IEEE IECON. – 2020.
3. Buso S., Mattavelli P. Digital Control in Power Electronics // Morgan & Claypool. – 2006.
4. Dorf R.C., Bishop R.H. Modern Control Systems // Pearson Education. – 2017.
5. Erickson R.W., Maksimović D. Fundamentals of Power Electronics // Springer. – 2001.
6. Fang Y., Zhu Y., Fei J. Adaptive intelligent sliding mode control of a photovoltaic grid-connected inverter // Applied Sciences. – 2018.
7. Ghamari S., Narm H.H.G. et al. Fractional-order fuzzy PID controller design on buck converter with antlion optimization algorithm // IET Control Theory & Applications. – 2022.
8. Gómez P.J. Optimal switching sequence model predictive control for single-phase cascaded H-bridge // IEEE IECON. – 2021.
9. Saadat S. Adaptive neuro-fuzzy inference systems (ANFIS) controller design on single-phase full-bridge inverter // IET Power Electronics. – 2021.

10. Карпиленко Ю., Климов В., Климова С., Смирнов В. Прецизионный стабилизатор напряжения с двойным преобразованием энергии // Силовая электроника. – 2009.