

# **РАЗРАБОТКА НЕСИММЕТРИЧНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ВСТАВКИ НЕСИНХРОННОЙ СВЯЗИ НА БАЗЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ**

Александр Сергеевич Чугуевский, Алексей Сергеевич Васильев

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский политехнический  
университет» (ТПУ).

ОЭС Востока работает изолированно от остальных энергообъединений в составе ЕЭС России. Пропускная способность вставки несинхронной связи (ВНС) не обеспечивает заявленный диапазон регулирования перетока активной мощности ввиду наличия дополнительной тепловой нагрузки на оборудование ВНС от потребляемых из сети несимметричных токов и токов высших гармоник. Данное обстоятельство приводит к перегрузкам оборудования ВНС и отключению установки от сети защитой.

В данной работе предлагается разработка несимметричной системы автоматического управления (САУ) для снижения тепловой (токовой) нагрузки и обеспечения допустимых уровней напряжения основного оборудования ВНС. Разрабатываемая САУ будет осуществлять постоянную корректировку работы ВНС с учётом влияния режима работы внешней сети. Наличие несимметричного регулирования позволяет реализовать активное симметрирование напряжения в узле присоединения ВНС или на шинах высшего напряжения подстанции.

Система автоматического управления СТАТКОМ строится в соответствии с принципами подчинённого регулирования: внешние контуры регулирования активной мощности либо напряжения на конденсаторной батарее (КБ) в цепи постоянного напряжения и реактивной мощности либо напряжения в сети формируют задание на регуляторы внутренних контуров активного и реактивного тока. При этом, регулирование активной и реактивной составляющих осуществляется независимо (параллельно), а сигнал задания на ток может быть легко ограничен. Структурная схема симметричной САУ, реализующая данные принципы, представлена на рисунке 1.

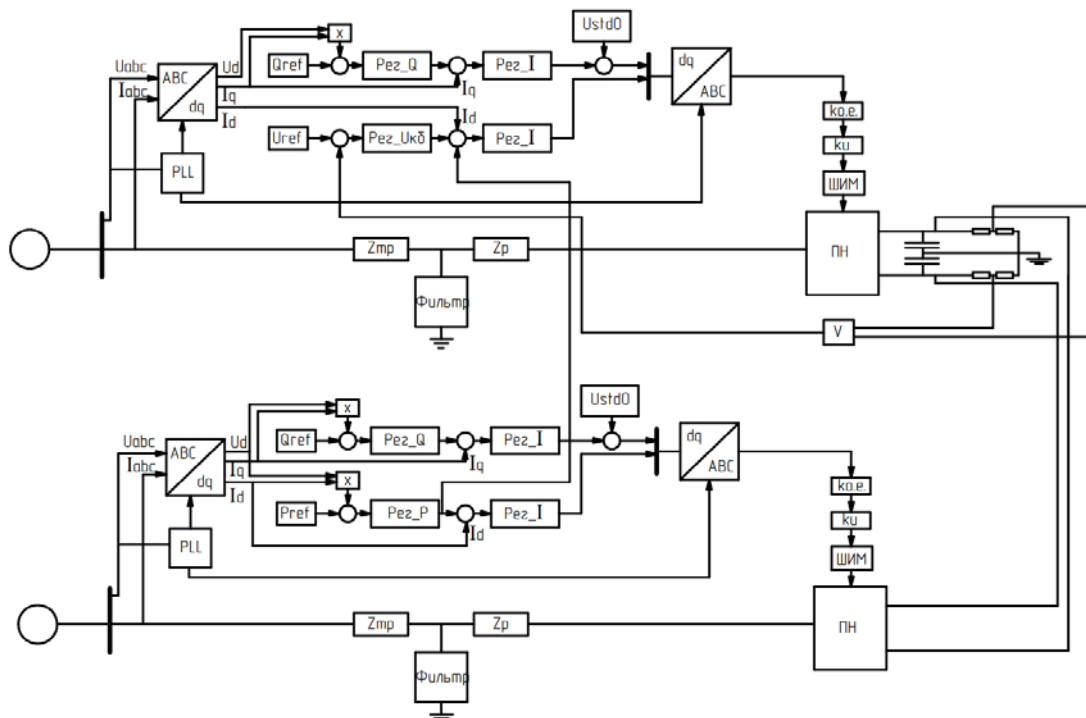


Рисунок 1 – структурная схема САУ ВНС

ВНС как объект управления обладает свойствами практически безынерционного звена с запаздыванием, определяемым частотой коммутации вентилях. Поэтому для обеспечения помехозащищенности необходимо ввести в канале управления инерционную составляющую с постоянной времени  $T_{\mu}$ . Контур регулирования тока должны осуществлять астатическое регулирование с максимально возможным быстродействием и небольшим перерегулированием либо по апериодическому закону. Передаточные функции регуляторов тока, удовлетворяющих данным требованиям, имеют идентичный вид [1]

$$W_{PT}(p) = W_{IP}(p) / W_{OY}(p) = \frac{Z_{св}}{2T_{\mu}^2 p^2 + 2T_{\mu} p}; \quad (1)$$

где  $W_{PT}(p)$  – передаточная функция регулятора тока;

$Z_{св}$  – сопротивление связи.

На вход регуляторов, составляющих тока должна приходиться разность заданных (требуемых) и измеренных значений, на выходе регуляторы формируют составляющие напряжений, определяющие токи в сопротивлении связи.

Для внешнего контура регулирования активной или реактивной мощности для обеспечения астатического регулирования достаточно использовать интегральный регулятор:

$$W_{PM}(p) = \frac{1}{2 \cdot (2T_{\mu}p)}; \quad (2)$$

где  $W_{PM}(p)$  – передаточная функция регулятора мощности (активной или реактивной).

Поскольку формирование напряжения на статическом преобразователе осуществляется с помощью широтно-импульсной модуляции, то для работы ВНС необходимо поддерживать стабильный уровень напряжения на КБ в цепи постоянного напряжения.

Передаточная функция объекта управления по напряжению на конденсаторной батарее имеет вид:

$$W_{OUKB}(p) = \frac{U_{KB}(p)}{I_d(p)} = \frac{1}{C_p}; \quad (3)$$

В данном случае для обеспечения нулевой ошибки регулирования структура регулятора должна содержать интегрирующее звено. В таких случаях в технике часто применяют другой тип структуры – системы, настроенной на «симметричный оптимум». Передаточная функция регулятора, настроенного на «симметричный оптимум» выглядит следующим образом:

$$W_{KB}(p) = \frac{(4 \cdot T_{\mu}p + 1) \cdot C_p}{8 \cdot T_{\mu}^2 p^2 \cdot (T_{\mu}p + 1)}; \quad (4)$$

В результате мы имеем два блока СТАТКОМ, соединенных шиной постоянного напряжения, что позволяет обеспечивать обмен активной мощностью обоих знаков между сетями. Также в каждом из блоков установлен регулятор реактивной мощности для обмена реактивной мощностью с примыкающей сетью.

Для повышения устойчивости САУ вводится компенсирующая связь по возмущению – заданию по активному току со стороны регулятора активной мощности. Это приводит к снижению динамических отклонений напряжения на КБ цепи постоянного напряжения.

Несимметричная САУ ВНС разрабатывается на основе симметричной САУ путём добавления контуров регулирования по обратной последовательности тока.

В случае значительной величины перетока мощности через ВНС и увеличения коэффициента обратной последовательности напряжения сверх допустимого алгоритм несимметричного управления снижает ток обратной последовательности до нуля, тем самым равномерно распределяя нагрузку по фазам, частично восстанавливая величину регулировочного диапазона. В случае небольших перетоков мощности, уставку по току обратной последовательности можно несколько увеличить. В таком случае ВНС будет осуществлять активное симметрирование напряжения, повышая таким образом, качество электроэнергии во внешней сети.

Принцип формирования контуров регулирования по обратной последовательности аналогичен принципам формирования регуляторов тока симметричной САУ. Структурная схема несимметричной САУ представлена на рисунке 2.

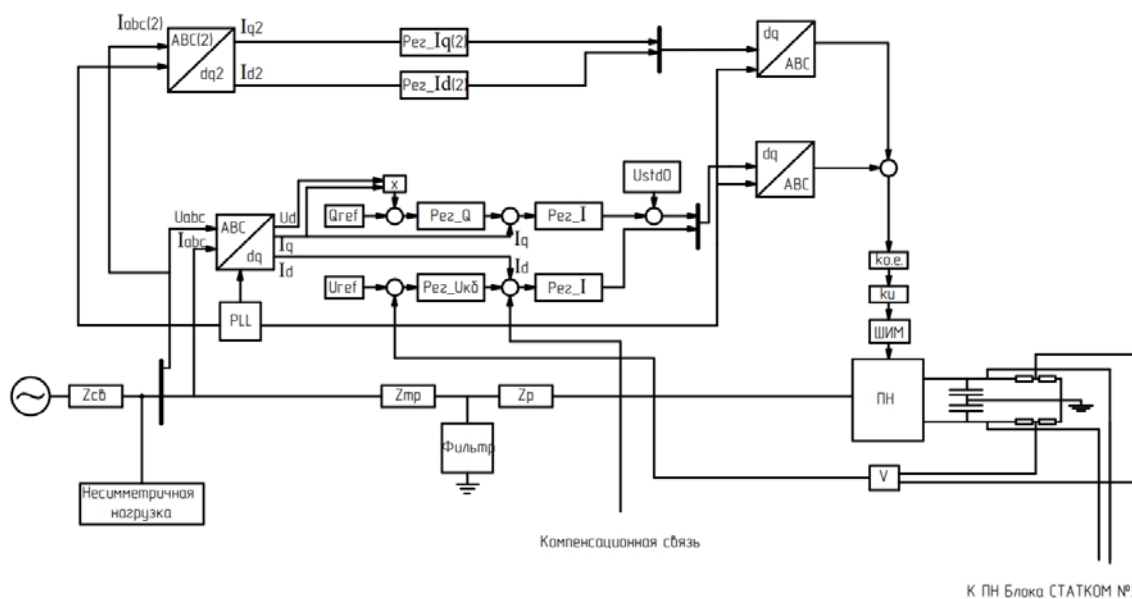


Рисунок 2 – Структурная схема несимметричной САУ ВНС

Для исследования влияния несимметричной нагрузки в Забайкальском крае на функционирование ВНС необходимо произвести серию расчётов электрических режимов для определения пропускной способности ВНС. Расчет электрических режимов выполнен с контролем тока в фазных реакторах и напряжения на фильтре для несимметричного режима работы САУ.

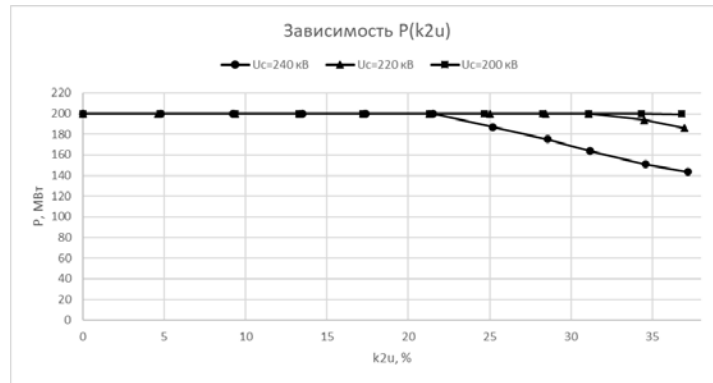


Рисунок 3 – Зависимость величины активной мощности от коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности

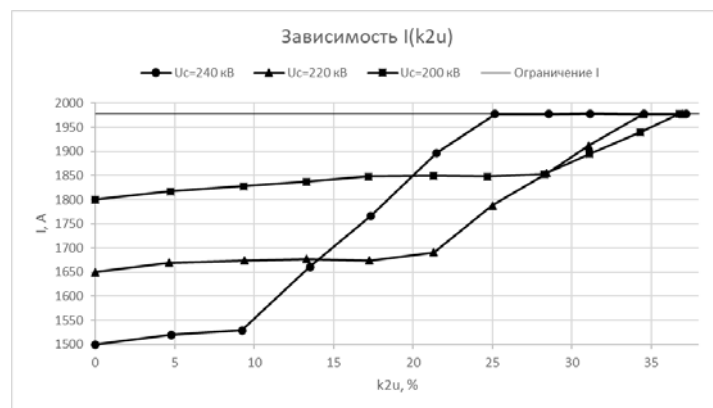


Рисунок 4 – Зависимость величины тока от коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности

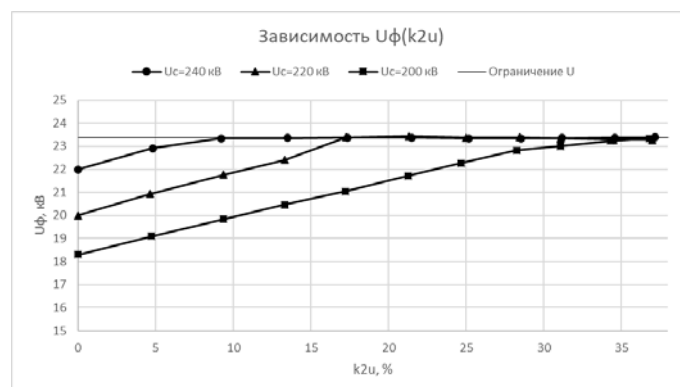


Рисунок 5 – Зависимость величины фазного напряжения от коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности

В результате проведённых опытов можно сделать вывод, что при использовании симметричной САУ фактором, ограничивающим переток активной мощности, является перегрузка по току одной из фаз оборудования ВНС. При использовании алгоритма несимметричного управления осуществляется перераспределение нагрузки по фазам, в следствие чего, превышение тока сверх допустимых значений не наблюдается. Однако при работе контуров регулирования, эффект симметрирования напряжения ВНС пропадает, что приводит к увеличению коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности.

### **Заключение**

В ходе исследования были разработаны симметричная и несимметричная САУ. Исследование влияния несимметрии напряжения в электрической сети подтвердило гипотезу об ограничении пропускной способности ВНС вследствие, в первую очередь, неравномерности загрузки фаз статического преобразователя.

Проанализировав результаты исследования, можно сделать вывод, что, применённый метод коррекции системы управления ВНС с помощью добавления алгоритма симметрирования является достаточно эффективным. При небольших значениях несимметрии остаётся возможность участия ВНС в симметрировании напряжения путём потребления несимметричных токов. По мере увеличения несимметрии и роста токовой нагрузки оборудования обеспечение предельной передаваемой мощности по ВНС достигается за счет постепенного снижения токов обратной последовательности и, как следствие, увеличения равномерности загрузки всех фаз.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. А. С. Васильев, Р. А. Уфа. Управляемые электропередачи на базе силовой электроники: Учебное пособие. Томск: ТПУ, 2021. – 142 с.

Научный руководитель: А. С. Васильев, к.т.н.