

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

**ДИНАМИКА
НЕЛИНЕЙНЫХ
ДИСКРЕТНЫХ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ
И ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ**

**Материалы
XIV Всероссийской научно-технической
конференции**

ДНДС–2021

Чебоксары
2021

УДК 621.3:004(063)

ББК 381:321Я73

Д44

Редакционная коллегия:

ректор, канд. экон. наук, доцент *А.Ю. Александров*;

д-р техн. наук, профессор *Г.А. Белов*;

канд. техн. наук, доцент *А.В. Серебрянников*

Печатается по решению Ученого совета

Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова

Динамика нелинейных дискретных электротехнических
Д44 и электронных систем: материалы XIV Всерос. науч.-техн.
конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2021. 536 с.

ISBN 978-5-7677-3286-9

Рассматриваются вопросы математических основ и математического моделирования нелинейных дискретных систем, цифровой обработки сигналов, построения и анализа устройств и систем силовой электроники, систем электроэнергетики и электропривода.

Для научных работников, инженеров, менеджеров и студентов старших курсов.

УДК 621.3:004(063)

ББК 381:321Я73

© Издательство

Чувашского университета, 2021

ISBN 978-5-7677-3286-9

Александрова М.И., Иванов Н.Г., Антонов В.И., Наумов В.А.
(Чебоксары, ООО НПП «ЭКРА», ЧГУ)

МОДЕЛЬ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ УПРАВЛЯЕМОЙ КОММУТАЦИИ

Коммутация силового электрооборудования в сети сопровождается переходными процессами, которые в некоторых случаях могут привести к повреждению оборудования и нарушению работы сети. Для предотвращения негативного влияния переходных процессов на электрооборудование используют устройства управляемой коммутации, принцип работы которых заключается в управлении моментом замыкания и размыкания контактов выключателя таким образом, чтобы коммутация произошла в оптимальный момент, характеризующийся низкой интенсивностью переходных процессов [1–4].

Оптимальные фазы коммутации оборудования зависят от типа оборудования (шунтирующий реактор, конденсаторная батарея, трансформатор, линия электропередачи) и схемы соединения, а также от электромеханических характеристик выключателя. При выборе уставок устройства управляемой коммутации удобно опираться на средства моделирования; они позволяют подтверждать оптимальность уставок, выбранных аналитически, и выбрать необходимые уставки в тех случаях, когда аналитический расчет вызывает трудности. Однако в известных средах моделирования электромагнитных переходных процессов (PSCAD, RTDS, Simulink и др.) применяются упрощенные модели выключателей, в которых отсутствует учет электромеханических характеристик, что снижает качество моделирования устройств управляемой коммутации.

В настоящей работе разрабатывается модель высоковольтного выключателя, учитывающая особенности устройств управляемой коммутации силового электрооборудования и пригодная для исследования их алгоритмов.

В идеальном выключателе замыкание электрической цепи наступает строго в момент механического касания контактов t_{elec} (рис. 1). В реальном процессе включения сближение контактов выключателя и снижение электрической прочности межконтактно-

го промежутка происходит с конечной скоростью [5, 6]. В результате электрическая прочность межконтактного промежутка изменяется от максимального значения, когда контакты разведены на максимальное расстояние, до нуля, когда контакты замкнуты. Вследствие этого момент замыкания электрической цепи не совпадает с механическим замыканием контактов; он наступает при пересечении линии электрической прочности межконтактного промежутка с кривой напряжения на контактах выключателя.

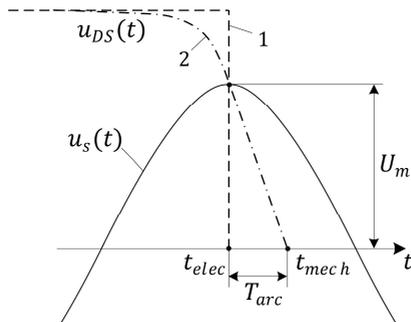


Рис. 1. Влияние RDDS идеального (1) и реального (2) выключателей на момент замыкания электрической цепи: $u_s(t)$ — напряжение питающей системы; U_m — амплитуда питающего напряжения; $u_{DS}(t)$ — электрическая прочность межконтактного промежутка; t_{elec} — момент замыкания электрической цепи; t_{mech} — момент механического замыкания контактов выключателя; T_{arc} — время горения дуги

В общем случае электрическая прочность изменяется нелинейно [7], но на конечном участке имеет практически линейный характер. Скорость снижения электрической прочности промежутка выключателя характеризуется параметром, называемым RDDS (Rate of Decay of Dielectric Strength)

$$RDDS = \frac{u(t_{elec})}{t_{mech} - t_{elec}} \text{ [кВ / мс]},$$

где t_{elec} — момент замыкания электрической цепи (момент зажигания дуги), t_{mech} — момент механического касания контактов выключателя. Для идеального выключателя RDDS равен бесконечности.

В процессе отключения выключателя прерывание тока в цепи происходит вблизи момента перехода кривой тока через нуль, следующего за моментом размыкания контактов выключателя. Электрическая прочность межконтактного промежутка по-

сле гашения дуги восстанавливается до некоторого значения, зависящего от расстояния между контактами. После отключения со стороны коммутируемого оборудования начинает восстанавливаться напряжение, называемое переходным восстанавливающимся (ПВН), вследствие чего напряжение на контактах выключателя может достигать удвоенной амплитуда питающего напряжения. Если к этому моменту контакты выключателя не успевают разойтись на достаточное расстояние, то возникают повторные зажигания дуги и пробои, которые приводят к износу контактов и перенапряжениям в сети.

Изменение электрической прочности при отключении на конечном участке можно представить в виде линейной характеристики (рис. 2). Скорость восстановления электрической прочности промежутка выключателя характеризуется параметром RRDS (Rate of Rise of Dielectric Strength) [8], который может быть представлен зависимостью

$$RRDS = \frac{u(t_{mech})}{t_{elec} - t_{mech}} \text{ [кВ / мс]}.$$

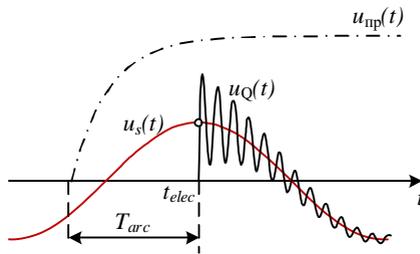


Рис. 2. Пример кривой восстановления электрической прочности $u_{пр}(t)$: $u_s(t)$ – напряжение питающей системы; $u_Q(t)$ – напряжение на контактах выключателя; t_{elec} – момент замыкания электрической цепи; T_{arc} – время горения дуги

Момент прерывания тока может не совпадать с моментом естественного перехода тока через нуль из-за эффекта среза тока. Под срезом тока понимают досрочное прерывание тока до естественного перехода через нуль. В вакуумных выключателях ток среза определяется, главным образом, материалом контактов. Последствием среза тока являются высокочастотные перенапряжения, которые повышают риск возникновения повторных пробоев межконтактного промежутка [9].

Модель выключателя. В среде имитационного моделирования Simulink была разработана модель высоковольтного выключателя, учитывающая динамические характеристики и срез тока (рис. 3).

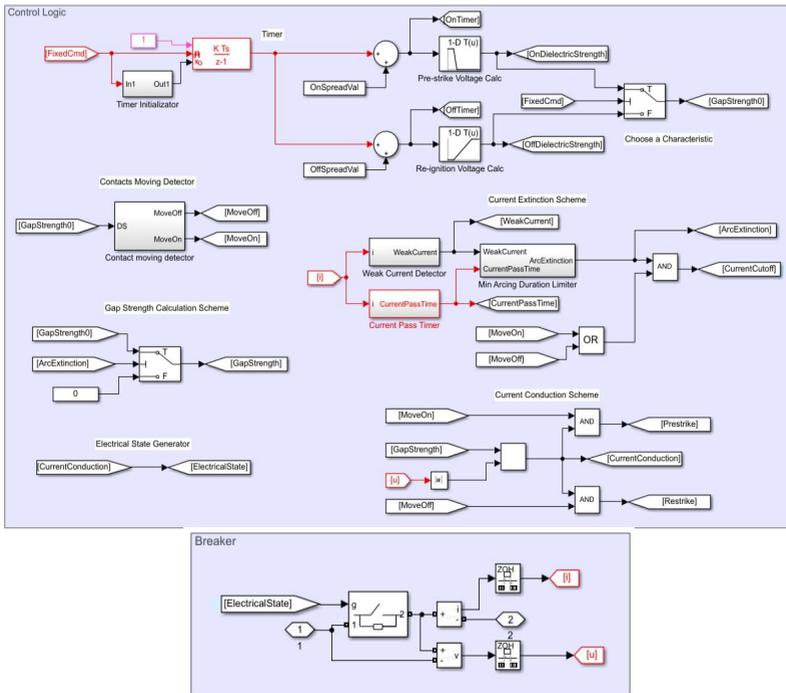


Рис. 3. Имитационная модель выключателя в среде Simulink

Основными элементами модели являются: идеальный ключ; схема управления ключом, содержащая узел расчета значения электрической прочности межконтактного промежутка и узел моделирования эффекта среза тока.

Электрическая прочность межконтактного промежутка рассчитывается по формуле

$$u_{DS}(t) = \begin{cases} u_{DS,on}(t), & \text{если } (Op = On) \text{ и } (|i| > i_{coff}), \\ u_{DS,off}(t), & \text{если } (Op = Off) \text{ и } (|i| > i_{coff}), \\ 0, & \text{если } |i| \leq i_{coff}, \end{cases}$$

где $u_{DS,on}$ и $u_{DS,off}$ – электрическая прочность при включении и отключении соответственно; Op – вид операции (On – включение, Off – отключение); i_{coff} – значение среза тока.

В модели задаются следующие параметры: частота дискретизации, характеристики снижения и восстановления электрической прочности межконтактного промежутка, разброс времени действия выключателя по закону нормального распределения, ток среза, начальное состояние выключателя и минимальное время горения дуги (рис. 4). Характеристики электрической прочности межконтактного промежутка задаются по точкам. Это позволяет задавать нелинейные характеристики, близкие к реальным характеристикам высоковольтных выключателей.

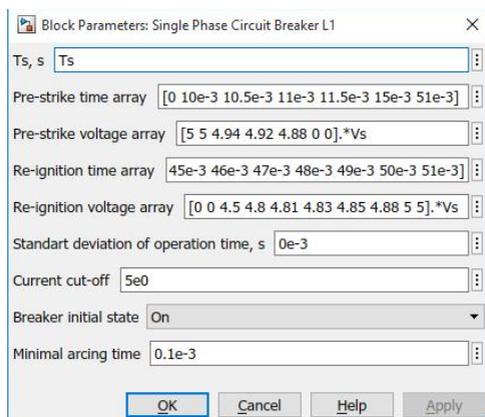


Рис. 4. Блок настройки модели выключателя

На рис. 5 приведен пример осциллограмм напряжения и тока при неоптимальном включении конденсаторной батареи. В момент $t = 0,055$ мс напряжение на межконтактном промежутке превышает напряжение электрической прочности и происходит пробой, сопровождаемый броском тока. В результате пробоя напряжение на контактах выключателя стало равным нулю.

Пример осциллограмм напряжения и тока при неудачном отключении конденсаторной батареи приведен на рис. 6. Из осциллограмм видно, что при пересечении кривой напряжения на контактах выключателя кривой электрической прочности межконтактного

промежутка, показанной пунктирной линией, происходит повторный пробой, сопровождаемый броском тока и высокочастотными колебаниями напряжения на контактах выключателя.

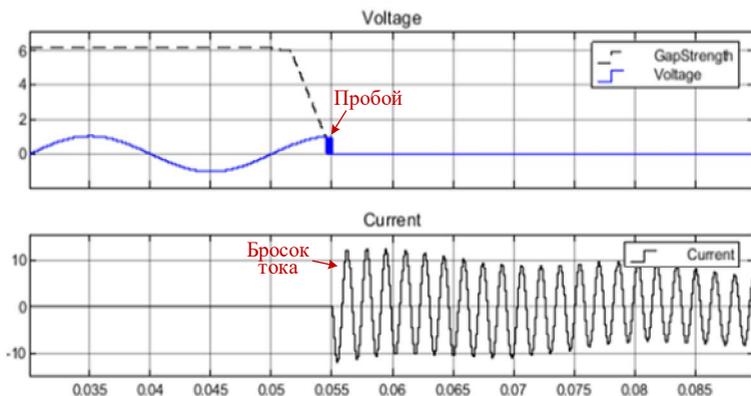


Рис. 5. Осциллограммы напряжения и тока одной фазы при включении конденсаторной батареи

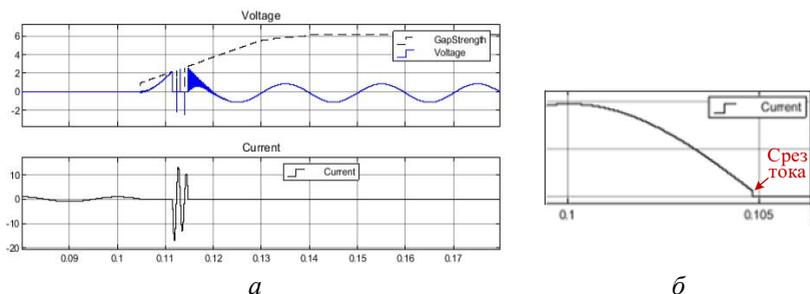


Рис. 6. Результаты моделирования отключения конденсаторной батареи: осциллограммы напряжения и тока одной фазы при отключении конденсаторной батареи (а); срез тока на осциллограмме тока (б)

В разработанной модели учтены основные электромеханические характеристики выключателя (изменение электрической прочности межконтактного промежутка, срез тока), оказывающие существенное влияние на переходные процессы при управляемой коммутации.

Модель высоковольтного выключателя позволяет определять уставки для трехфазного оборудования с электрической

связью между фазами и проверять оптимальность рассчитанных уставок для всех видов оборудования.

Литература

1. Guidelines and best practices for the commissioning and operation of controlled switching projects / A. Mercier [et. al.] // CIGRE Technical Brochure No. 757. February, 2019. 369 p.

2. Универсальные принципы управляемой коммутации силового электрооборудования / М. И. Александрова [и др.] // Релейная защита и автоматизация. 2019. № 1 (34). С. 49–54.

3. An Optimal Strategy for Three-Phase Intelligent Auto-Reclosing of Power Lines with Shunt Reactors / N. Ivanov [et al.] // 2020 Ural Smart Energy Conference (USEC), Ekaterinburg, 2020. PP. 31-34. DOI: 10.1109/USEC50097.2020.9281271.

4. Fundamentals of Intelligent Automatic Reclosing of Long-Distance Transmission Lines with Shunt Reactors / N. G. Ivanov [et al.] // Russian Electrical Engineering. 2019. Vol. 90. No. 8. PP. 558–564.

5. A unified approach to controlled switching of power equipment / Benmouyal Gabriel [et al.] // 44th Annual Western Protective Relay Conference, October 2017.

6. Учёт электромеханических характеристик высоковольтных выключателей в алгоритмах управляемой коммутации линий электропередачи (конденсаторных батарей) / Н. Г. Иванов [и др.] // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы XII Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2020. С. 423–428.

7. Рашкев В. С., Хоециан К. В., Вишневецкий Ю. И. Электромеханические характеристики воздушных выключателей серии ВВБ // Электричество. 1975. № 4. С. 41–45.

8. Технология управляемой коммутации и мониторинга выключателей для электроэнергетики и промышленности. Особенности применения и перспективы внедрения / Д. М. Журавлев [и др.] // Релейная защита и автоматика энергосистем: сб. докладов XXII конф. М., 2014. С. 34–42.

9. Optimal Conditions for Controlled Switching of a Three-phase Shunt Reactor / M. I. Aleksandrova [et al.] // Power Technology and Engineering. Sept. 2020. No. 3. Vol. 54. PP. 438–443.

Научное издание

**ДИНАМИКА НЕЛИНЕЙНЫХ ДИСКРЕТНЫХ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ**

Материалы XIV Всероссийской научно-технической конференции

*Материалы публикуются в авторской редакции.
Ответственность за достоверность цитат, имён, названий
и иных сведений, а также за соблюдение законов
об интеллектуальной собственности
несут авторы представленных статей*

Отв. за выпуск *А.В. Серебрянников*

Согласно Закону № 436-ФЗ от 29 декабря 2010 года
данная продукция не подлежит маркировке

Подписано в печать 28.05.2021. Формат 60×84/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Times.
Усл. печ. л. 31,15. Уч.-изд. л. 30,88. Тираж 300 экз. Заказ № 604

Отпечатано в соответствии с представленным оригинал-матетом
в типографии Чувашского государственного университета
428015 Чебоксары, Московский просп., 15