

УДК 621.315/316.351

РАСЧЕТ МАКСИМАЛЬНЫХ ТЯЖЕНИЙ ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ ПО ИМПУЛЬСУ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ УСИЛИЙ

Ковальшен И.И., Попко Ю.Л., Тычина А.С.

Научный руководитель – д-р техн. наук, профессор СЕРГЕЙ И.И.

Необходимость учета возможности возникновения чрезмерных механических нагрузок на проводники и элементы конструкции линий электропередачи и распределительных устройств с гибкими проводниками при их колебаниях во время коротких замыканий (КЗ) и сразу после отключения тока КЗ была осознана энергетиками еще в середине прошлого века. Неуклонный рост тока КЗ, увеличение электродинамических сил при КЗ на конструкции делают проблему расчета электродинамической стойкости гибких проводников с каждым годом все более актуальной.

Проблема оценки электродинамической стойкости гибких проводников – это проблема оценки смещений проводников при их колебаниях во время КЗ и после него, оценки тяжений в проводниках во время колебаний, вызванных электродинамическими силами, проблема надежного определения моментов времени, когда после отключения тока КЗ сближение проводников максимально и опасно с точки зрения пробоя изоляции, проблема (при увеличенных смещениях) уверенной оценки возможности реализации максимального сближения во время бестоковой паузы, проблема оценки опасности схлестывания проводников при КЗ.

Международные комитеты SC23 и TC73 рекомендуют к применению две методики расчета электродинамической стойкости гибких проводников.

Первая, названная «упрощенной» (simplified method), позволяет получать оценки «ручным счетом» без обращения к компьютеру, используя лишь формулы и расчетные графики.

Вторая (advanced method) предусматривает получение более точного решения задачи, учитывающего множество особенностей конструкции, частью которой являются гибкие проводники, и изучение поведения проводников во время КЗ и после него. Это более точное решение можно получить с использованием компьютера.

Для «упрощенного» метода в качестве расчетной модели гибкого проводника уже давно был выбран жесткий физический маятник с массой, сосредоточенной в его центре тяжести.

Упрощенный метод разработан для линий с проводниками, у которых все опоры лежат в одной горизонтальной плоскости. Расчетным считается двухфазное КЗ. Движение расчетной модели каждого из двух короткозамкнутых жестких шин-маятников описывается уравнением колебаний маятника.

Решение уравнения колебаний маятника даст возможность вычислять горизонтальные смещения проводников в любой момент времени, смещения в момент отключения тока КЗ, экстремальные смещения, работу электродинамических сил, тяжения в проводниках. Предусматривается возможность приближенного учета нагрева проводников во время КЗ, возможность приближенного упругих деформаций опор шин.

«Уточненный» расчет – это расчет электродинамической стойкости методом конечных элементов или методом конечных разностей. Суть метода конечного элемента заключается в следующем. Изучаемая конструкция расчленяется на «куски» (большие, малые или очень малые). Записываются уравнения движения и деформации «кусков», условия совместности их деформации. Далее ведется численное пошаговое решение полученных соотношений. Решение столь многомерных задач возможно только на

ЭВМ. Степень точности решения зависит от размера элементарных «кусков», полноты и точности записи исходных данных, сил взаимодействия элементов, от шага вычислений.

Программы для решения задачи в среде FORTRAN позволяют учесть многие особенности конструкции и условия, возникающие при КЗ, получать хорошие оценки электродинамической стойкости гибких проводников, но они требуют затрат времени и средств.

По мнению авторов рекомендаций SC23 и NC73. «уточненный» метод расчета электродинамической стойкости целесообразен только при:

- параметрическом анализе конструкций;
- оптимальном выборе параметров стандартных конструкций;
- изучении нетрадиционных структур;
- установлении возможности использования существующих конструкций для передачи мощности сетями более высокого напряжения.

В дополнение к «упрощенной» и «уточненной» методикам расчета предлагаются методики расчета «средней» точности («medium methods»). Методики эти строятся с помощью модели провода в пролете, обладающей несколькими степенями свободы. Примером такой модели проводника может служить двойной маятник.

Методики «средней» точности предназначаются для получения некоторой дополнительной информации, когда результаты расчетов по «упрощенной» методике недостаточны, а применение «уточненной» методики по тем или иным причинам нежелательно или невозможно.

В дальнейшем были опубликованы результаты исследований, проведенных на кафедре «Электрические станции» Минского политехнического института (ГБПИ) А.И. Руцким, М.И. Стрелюком и их коллегами.

Основное достижение минских исследователей – разработка и реализация программы для численного решения задач электродинамической стойкости гибких проводников.

Программа ГБПИ использует метод конечных разностей. Расчетная модель – гибкая упругая нить. Программа учитывает наличие отводов и спусков и действующие на них электродинамические силы, растяжение проводов при изменении тяжения, нагрев проводников при КЗ, демпфирование колебаний, упругие деформации опор. Предусмотрена возможность расчета линий с расщепленными фазами с учетом их скручивания.

Известны две достаточно полно разработанные «упрощенные» методики расчета смещений проводников при КЗ: предложенная комитетом SC23, TC73 и разработанная в МЭИ. Эти методики базируются на расчетной схеме проводника гибкой шинной линии в виде маятника на жестком подвесе с массой, сосредоточенной в центре массы провода в пролете.

Метод МЭИ достаточно прост. При решении нелинейного уравнения неустановившихся колебаний расчетного маятника на жестком подвесе под действием электродинамических сил вычисляется энергия WK, накопленная проводником во время КЗ. По энергии WK вычислялся предельные отклонения проводника от исходного равновесного положения во время и после КЗ. Приведенное к безразмерному виду уравнение колебаний маятника содержит лишь два безразмерных параметра, что позволяет определять WK по предварительно построенным расчетным графикам.

Методика МЭИ имеет существенные преимущества перед методикой SC23, TC73, так как процедура вычислений более простая, четко виден физический смысл всех вычислительных операций. В процессе решения не вводятся упрощающие допущения дополнительно к уже принятым при выборе расчетной схемы проводникам, как это дела-

ется в методике SC23, TC73. Дополнительные допущения неизбежно снижают точность расчета.

Наиболее существенным недостатком методики SC23, TC73 являются переоценка возможностей расчетной модели – жесткого маятника – и выдача рекомендаций по оценке параметров движения расчетной модели после отключения тока КЗ, обещающих высокую точность вычислений, в то время как эту точность модель обеспечить не может. Оценки максимальных смещений в проводниках и тяжений в них получаются уверенно. Подробности поведения проводников при больших отклонениях описываются неубедительно.

УДК 621.311:618.5

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ МЕТОДАМИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Кожушко С.А., Макаревич Л.В.

Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент РУМЯНЦЕВ В.Ю.

Настройка системы автоматического регулирования (САР) высокого порядка на оптимальные показатели качества может быть решена только с использованием современных систем математического моделирования. В качестве такой системы использовалась универсальная система блочного имитационного визуально-ориентированного математического моделирования VisSim 4.5, созданная корпорацией Visual Solution Inc. (США).

Исследовалась статическая система 4-ого порядка с передаточной функцией в разомкнутом состоянии:

$$W_p(p) = \frac{K}{(T_1p + 1)(T_2p + 1)(T_3p + 1)(T_4p + 1)}.$$

Подобной передаточной функцией описываются многие технические системы, в частности, к такому виду можно привести САР напряжения синхронного генератора.

В среде VisSim была реализована математическая модель САР, состоящая из четырёх последовательно соединенных инерционных звеньев 1-го порядка. При подаче на вход системы единичного ступенчатого воздействия получается переходная характеристика, по которой можно определить прямые показатели качества (рисунок 1).

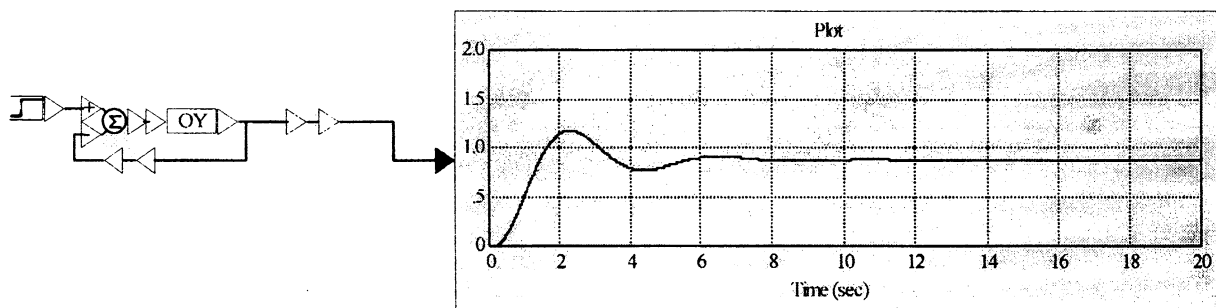


Рисунок 1

В процессе исследований системы ставилась задача найти такие соотношения между постоянными времени $T_1 - T_4$, чтобы, с одной стороны, обеспечить высокую точность поддержания регулируемого параметра (статика), и, с другой стороны, обес-