

Как видно из результатов эксперимента, удельное сопротивление ММ понижается с ростом щелочного числа, что можно объяснить увеличением концентрации моющих присадок, одни из которых – детергенты имеют ионный характер. И наоборот, значительно большее значение удельного сопротивления имеет отработанное ММ вследствие «вымывания» этих присадок в процессе эксплуатации ДВС. При этом эквивалентная емкость возрастает как следствие повышения диэлектрической проницаемости, что обусловливается присутствием в отработанном ММ металлических включений, золы, образующейся при сгорании детергентов и различных загрязнений, не вносящих, однако, вклада в проводимость, так как они находятся во взвешенном состоянии вследствие действия дисперсантов [5]. В качестве последних обычно применяются полимеры с полярными группами и слабые кислоты – сукцинимиды. Поэтому можно судить об их количестве по эквивалентной емкости, которая оказалась выше у полусинтетических ММ.

Таким образом, с помощью разработанной системы можно производить оценку качества как товарных ММ по заранее полученным диэлектрическим характеристикам ряда марок конкретного произво-

дителя, так и определять срабатываемость присадок в процессе эксплуатации и тем самым прогнозировать срок замены масла в ДВС.

Библиографические ссылки

1. Макишаков Е. Д. Температурная коррекция в релаксационном автогенераторном измерительном преобразователе // Вестник ИжГТУ. – 2011. – № 3(51). – С. 110–112.
2. Макишаков Е. Д., Подкин Ю. Г. Измерение параметров диссипативных СG-двухполосников. Ч. I // Информационное и техническое обеспечение инновационных технологий : Материалы республиканской науч.-метод. очно-заоч. конф. – Сарапул: Изд-во СПИ, 2010. – С. 61–70.
3. Макишаков Е. Д. Емкостный первичный измерительный преобразователь для сыпучих и жидких материалов // Информационное и техническое обеспечение инновационных технологий : Материалы республиканской науч.-метод. очно-заоч. конф. – Сарапул : Изд-во СПИ, 2011. – С. 34–36.
4. Подкин Ю. Г. Теоретические основы диэлькометрического контроля неравновесных дисперсных систем. – М. : Научтехлитиздат, 2003. – 158 с.
5. Моторные масла / Р. Балтенас [и др.]. – М. ; СПб. : Альфа-Лаб, 2000. – С. 272.

E. D. Makshakov, Post-graduate, Sarapul Polytechnical Institute (branch), Kalashnikov Izhevsk State Technical University

System of Express Analysis of Engine Oils Quality

Development of package for engine oil testing according to dielectric characteristics is considered. The system is based on a relaxation unit.

Key words: engine oil, permittivity, conductivity, relaxation converter, microcontroller, personal computer, backing space method.

УДК 621.314.2

А. Е. Фокеев, аспирант, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова
В. К. Барсуков, кандидат технических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Выполнено моделирование магнитного поля трехфазного силового трансформатора методом конечных элементов. Исследовано влияние формы токов в нагрузке на процесс перемagnetизации магнитопровода. Перераспределение магнитных потоков при работе трансформатора на нелинейную нагрузку приводит к изменению режима перемagnetизации, увеличению плотности вихревых токов в стали, потере в магнитопроводе и температуры перегрева магнитной системы.

Ключевые слова: трехфазный силовой трансформатор, несинусоидальный ток нагрузки, магнитное поле, конечно-элементное моделирование.

Силовой трансформатор является важнейшим элементом системы электроснабжения, от работы которого зависит надежность функционирования всей системы в целом. Увеличение доли нелинейной нагрузки приводит к возникновению несинусоидальных режимов [1]. Исследование процессов, происходящих в силовых трансформаторах при несинусоидальных режимах, является актуальной задачей, решение которой возможно с при-

менением систем инженерного анализа (CAE – Computer Aided Engineering) [2].

Исследование процессов в трансформаторе при нелинейной нагрузке проводилось экспериментально-расчетным методом. Метод основан на использовании для моделирования магнитного поля измеренных значений токов в обмотках трансформатора при нелинейной нагрузке. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1, а.

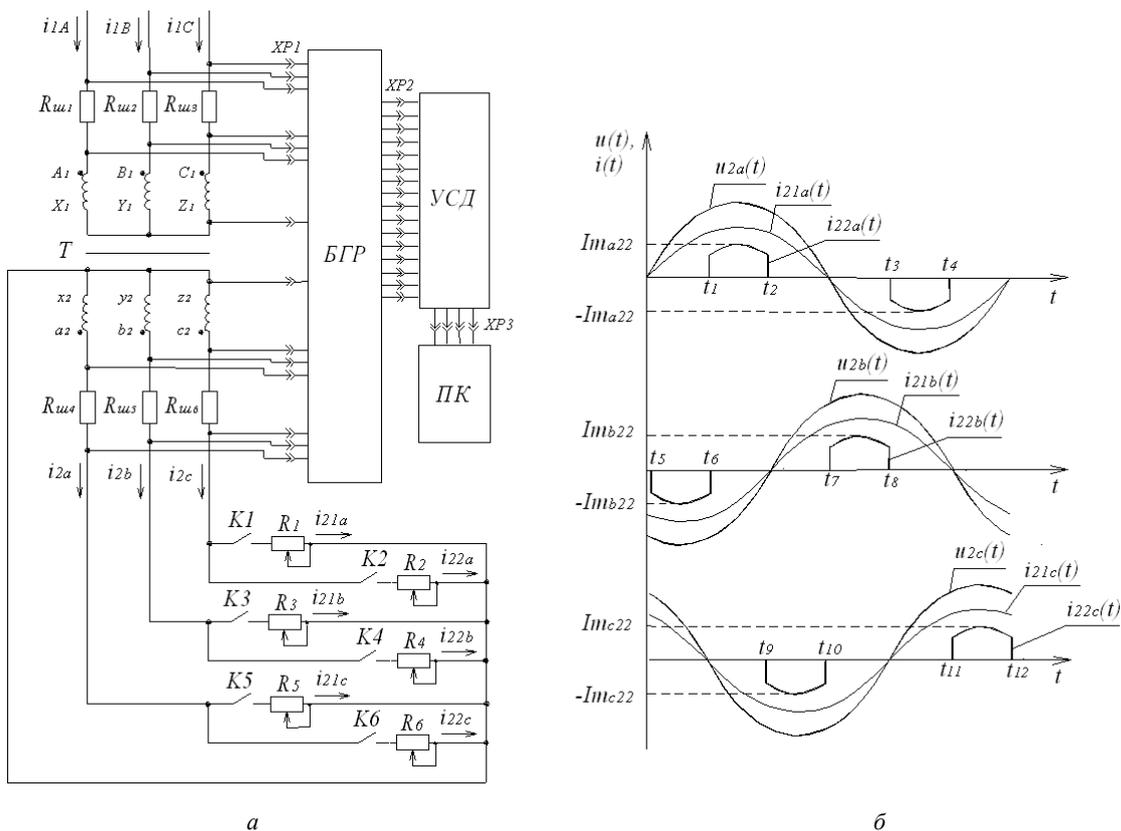


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (а) и диаграммы токов нагружения (б) для трехфазного силового трансформатора: Т – исследуемый трансформатор; БГР – блок гальванической развязки; УСД – устройство сбора данных; ПК – персональный компьютер; К1...К6 – управляемые электронные ключи; Rш1... Rш6 – измерительные шунты; R1...R6, – резисторы нагрузки

Установка позволила создавать различные режимы нагружения трансформатора за счет управления группами ключей К1, К3, К5 и К2, К4, К6 и регулировки величины сопротивления резисторов R1...R6. При замкнутых ключах К1, К3, К5 трансформатор нагружался на линейную нагрузку. Коммутация ключей К2, К4, К6 в определенные интервалы времени добавляла импульсную составляющую нагрузки, и общая нагрузка трансформатора становилась нелинейной. Диаграммы токов, характеризующих режимы нагружения трансформатора, приведены на рис. 1, б.

Массивы мгновенных значений токов и напряжений, измеряемых в ходе эксперимента, обрабатывались с помощью виртуальных приборов в среде графического программирования LabVIEW 2009. Моделирование магнитного поля осуществлялось методом конечных элементов в программе Elcut 5.1. Решалась задача моделирования нестационарного магнитного поля и нестационарной теплопередачи в осесимметричной постановке. Использовались измеренные значения токов $i_{1A,B,C}(t)$ фаз первичной обмотки, токов $i_{2a,b,c}(t)$ фаз вторичной обмотки и экспериментально определенная характеристика намагничивания магнитопровода, представленная в виде кусочно-линейно аппроксимированной кривой на рис. 2.

Из уравнения электрического состояния трансформатора следует, что при искажении кривых тока $i_{1A,B,C}(t)$, практически не влияющих на синусоидальность кривых напряжения $u_{1A,B,C}(t)$, форма кривых

ЭДС $e_{1A,B,C}(t)$ фаз первичной обмотки отличается от синусоидальной:

$$e_{1A,B,C}(t) = -w_1 \frac{d\Phi_{A,B,C}}{dt} = u_{1A,B,C}(t) - R_1 i_{1A,B,C}(t) - L_1 \frac{di_{1A,B,C}(t)}{dt}, \quad (1)$$

где R_1 – активное сопротивление фазы первичной обмотки; L_1 – индуктивность фазы первичной обмотки; w_1 – число витков в фазе первичной обмотки.

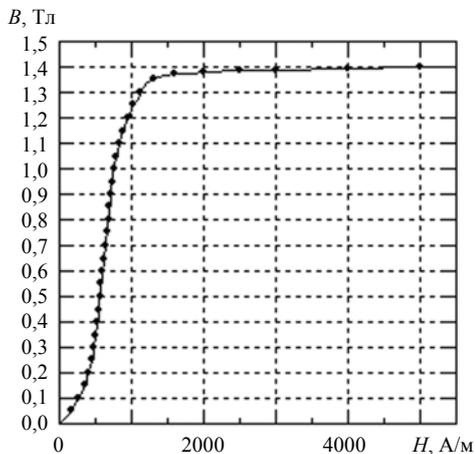


Рис. 2. Кривая намагничивания стали

Несинусоидальность ЭДС фаз первичной обмотки приводит к искажению формы кривых магнитного потока $\Phi_{СТ1,2,3}(t)$ и индукции $B_{СТ1,2,3}(t)$ в стержнях магнитопровода:

$$\Phi_{СТ1,2,3}(t) = -\frac{1}{w_1} \int e_{1,A,B,C}(t) dt; \quad (2)$$

$$B_{СТ1,2,3}(t) = \frac{\Phi_{СТ1,2,3}(t)}{S}, \quad (3)$$

где S – площадь поперечного сечения магнитопровода.

Полученные с помощью моделирования магнитного поля кривые изменения индукции $B_{СТ1,2,3}(t)$ в стержнях магнитопровода трехфазного трансформатора

при работе на нелинейную нагрузку (рис. 3, б) имеют несинусоидальную форму. Скорость изменения индукции магнитного поля на отдельных участках цикла перемагничивания при несинусоидальных токах нагрузки выше, чем в синусоидальном режиме (рис. 3, а).

Плотность вихревых токов в стали магнитопровода определяется соотношением [3]

$$J = \frac{E}{p} = \frac{x dB}{p dt}, \quad (4)$$

где E – напряженность электрического поля в точке на расстоянии x от середины листа; p – удельное сопротивление электротехнической стали магнитопровода.

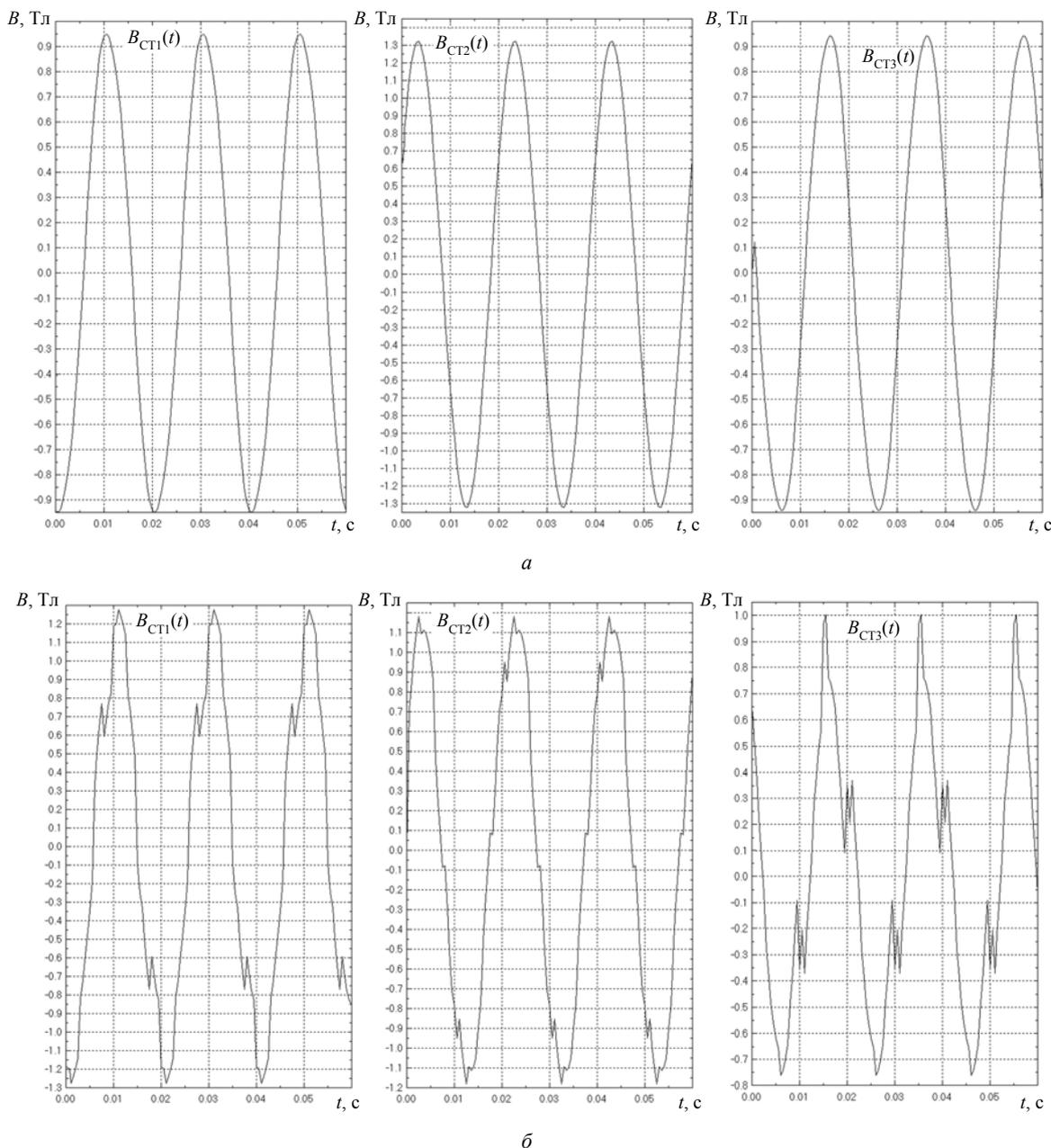


Рис. 3. Кривые индукции в стержнях магнитопровода трехфазного силового трансформатора при работе на линейную (а) и нелинейную (б) нагрузки

Из соотношения (4) следует, что увеличение скорости изменения индукции на отдельных участках цикла перемагничивания приводит к увеличению плотности вихревых токов в стали магнитопровода (рис. 4, б). Увеличение плотности вихревых токов вызывает увеличение потерь в стали магнитопровода, что сопровождается повышенным перегревом отдельных участков магнитной цепи. Вихревые токи оказывают экранирующее действие на магнитный поток в участке магнитопровода.

Несинусоидальность тока нагрузки приводит к увеличению поля рассеяния. Часть силовых линий поля рассеяния замыкается по краям магнитопровода. Наведенные полем рассеяния в крайних пакетах магнитопровода вихревые токи вызывают дополнительные потери в стали [4].

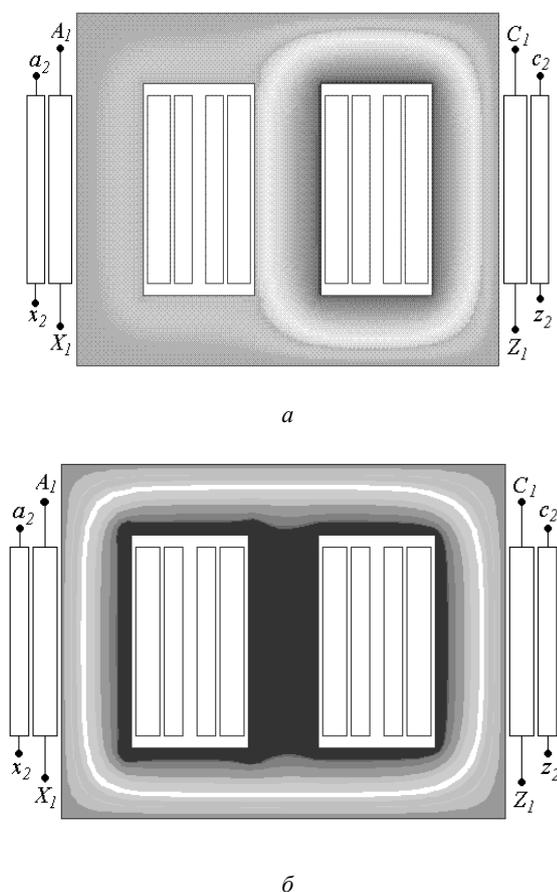


Рис. 4. Плотность вихревых токов в магнитопроводе для момента времени t_1 при работе трансформатора на линейную (а) и нелинейную (б) нагрузку

Участки магнитопровода с большей плотностью вихревых токов отображены более темными тонами, с меньшей – более светлыми.

Как показали исследования, потери в магнитопроводе, полученные в результате моделирования, отличаются от измеренных не более чем на 5 %.

Потери активной мощности в магнитопроводе трансформатора ΔP_0 нормировались относительно значения потерь холостого хода $P_{x,x}$ с помощью коэффициента кратности потерь

$$K_{P0} = \frac{\Delta P_0}{\Delta P_{x,x}} \tag{5}$$

Зависимость коэффициента кратности потерь в магнитопроводе K_{P0} от отношения амплитуды тока нелинейной нагрузки к амплитуде номинального тока вторичной обмотки $\frac{I_{m22}}{I_{m21}}$ определялась при различных значениях амплитуды тока линейной нагрузки I_{m21} (рис. 6).

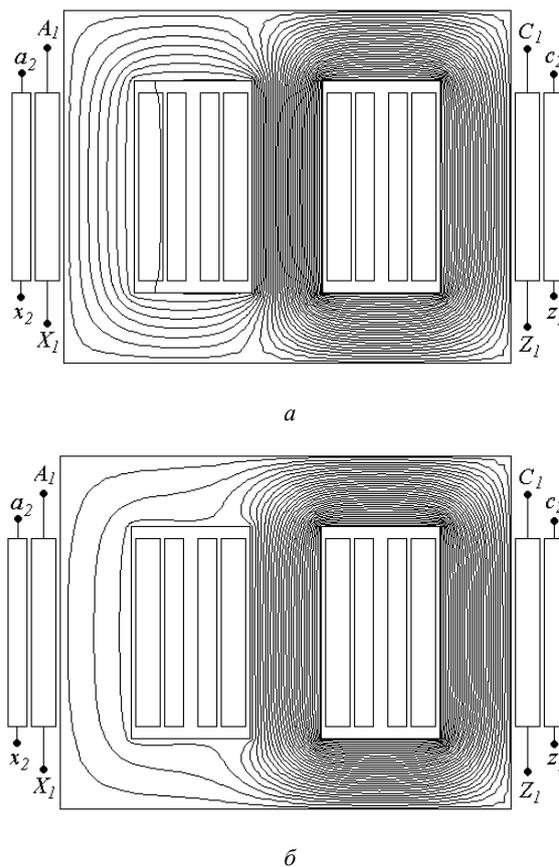


Рис. 5. Распределение силовых линий магнитного поля для момента времени t_1 при работе трансформатора на линейную (а) и нелинейную (б) нагрузку

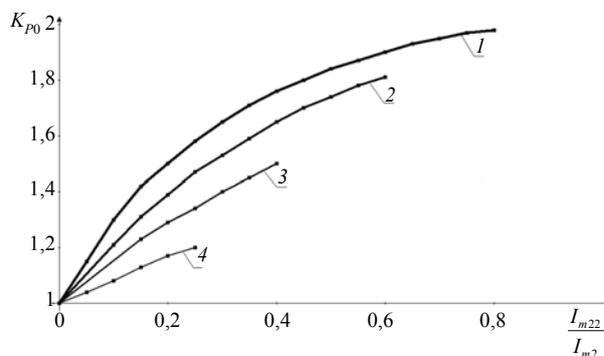


Рис. 6. Кратность увеличения потерь в магнитопроводе трехфазного силового трансформатора при несинусоидальном токе нагрузки: 1 – при $I_{m21} = 20\%$ от I_{m2} ; 2 – при $I_{m21} = 40\%$ от I_{m2} ; 3 – при $I_{m21} = 60\%$ от I_{m2} ; 4 – при $I_{m21} = 75\%$ от I_{m2}

Результаты моделирования, подтверждаемые данными экспериментального исследования, позволяют сделать вывод о существенном влиянии несинусоидальности токов нагрузки на работу трехфазных силовых трансформаторов. Перераспределение магнитных потоков при работе трехфазного трансформатора на нелинейную нагрузку приводит к изменению режима перемагничивания, увеличению плотности вихревых токов в стали, потере в магнитопроводе и изменению температурного поля магнитной системы. Потери в магнитопроводе силового трехфазного трансформатора при несинусоидальных режимах могут достигать до 200 % от номинального значения потерь холостого хода. Наблюдается увеличение потоков рассеяния при несинусоидальных режимах, что также может приводить к росту добавочных потерь и температуры перегрева проводящих элементов конструкции трансформатора (бак или кожух, прессующие кольца, ярмовые балки, нажимные и стяжные пластины, бандажи, электромагнитные и статические экраны, обмотки симметрирующих устройств).

Моделирование магнитного и теплового полей на основе экспериментально полученных токов при несинусоидальных режимах позволило получить наглядное представление о процессах, протекающих в магнитопроводе трансформатора. Достоверность результатов моделирования подтверждена инструментальными исследованиями трансформатора.

Библиографические ссылки

1. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – М. : Энергоатомиздат, 1974.
2. Hakansson D., Larsson J. Evaluation of software using the finite element method by simulating transformers. – Sweden : Linkoping, 2011.
3. Леуменс Л. В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов. – М. : Энергоатомиздат, 1981. – 392 с.
4. Сергеевков Б. Н., Киселев В. М., Акимова Н. А. Электрические машины. Трансформаторы / под ред. И. П. Копылова. – М. : Высш. шк., 1989. – 352с.

A. E. Fokeev, Post-graduate, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

V. K. Barsukov, PhD, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Modeling of Three-Phase Power Transformer

Modeling of three-phase power transformer magnetic field by finite element method is carried out. Influence of loading current type on magnetic core reversal is researched. Redistribution of magnetic flux at nonlinear loading transformer operation leads to change of magnetic reversal mode, increase of eddy currents density in steel, increase of losses in a magnetic core and magnetic system overheat temperature.

Key words: three-phase power transformer, non-sinusoidal loading current, magnetic field, finite element modeling.