

тем тягового электроснабжения: монография / Под ред. А.В. Крюкова. Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та путей сообщения. 2009. 124 с.

2. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Токо-распределение в проводах высоковольтных линий электропередачи // Системы. Методы. Технологии. №3.2010. С. 68-74.

3. Свидет. об офиц. регистр. программы для ЭВМ №2007612771 (РФ) «Fazonord-Качество / Закарюкин В.П., Крюков А.В. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товар-

ным знакам. Зарегистр. 28.06.2007.

4. В.А. Веников, А.А. Глазунов, Л.А. Жуков и др. Электрические системы. Электрические сети / Под ред. В. А. Веникова и В. А. Строева. М: Высш. шк., 1998. 511 с.

5. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2005. 273 с.

6. Вагнер К.Ф., Эванс Р.Д. Метод симметричных составляющих. Л.: ОНТИ НКПТ СССР, 1936.

УДК 621.315.1.001.63

Г. А. Большанин, Л. Ю. Большанина*

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ПЕРЕДАЧИ ПОСТОЯННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПО ОДНОРОДНОМУ УЧАСТКУ ТРЕХФАЗНОЙ ЛЭП ТРЕХПРОВОДНОГО ИСПОЛНЕНИЯ

Предложены расчетная электрическая схема замещения элементарного однородного участка линии электропередачи трехпроводного исполнения для постоянной составляющей напряжения и тока, математическая модель и методика прогнозирования передачи постоянной составляющей по этому участку. Построены графики распределения постоянной составляющей фазного напряжения и линейного тока вдоль несимметричного однородного участка трехфазной ЛЭП трехпроводного исполнения протяженностью 1000 км.

Ключевые слова: линия электропередачи, постоянные составляющие фазных напряжений, постоянные составляющие линейных токов, постоянная распространения, собственные волновые сопротивления.

В спектрах напряжений и токов, характеризующих электрическую энергию, транспортируемую по участкам электроэнергетических систем, вполне могут присутствовать и постоянные составляющие. Законы распределения постоянных составляющих напряжений и токов по токоведущим частям линии электропередачи (ЛЭП) заметно отличаются от законов распределения гармонических

составляющих напряжений и токов по этим же токоведущим частям.

Построение математической модели энергетического объекта следует выполнять на основании его электрической схемы замещения, элементы которой иллюстрируют процессы преобразования электрической энергии, происходящие в этом объекте.

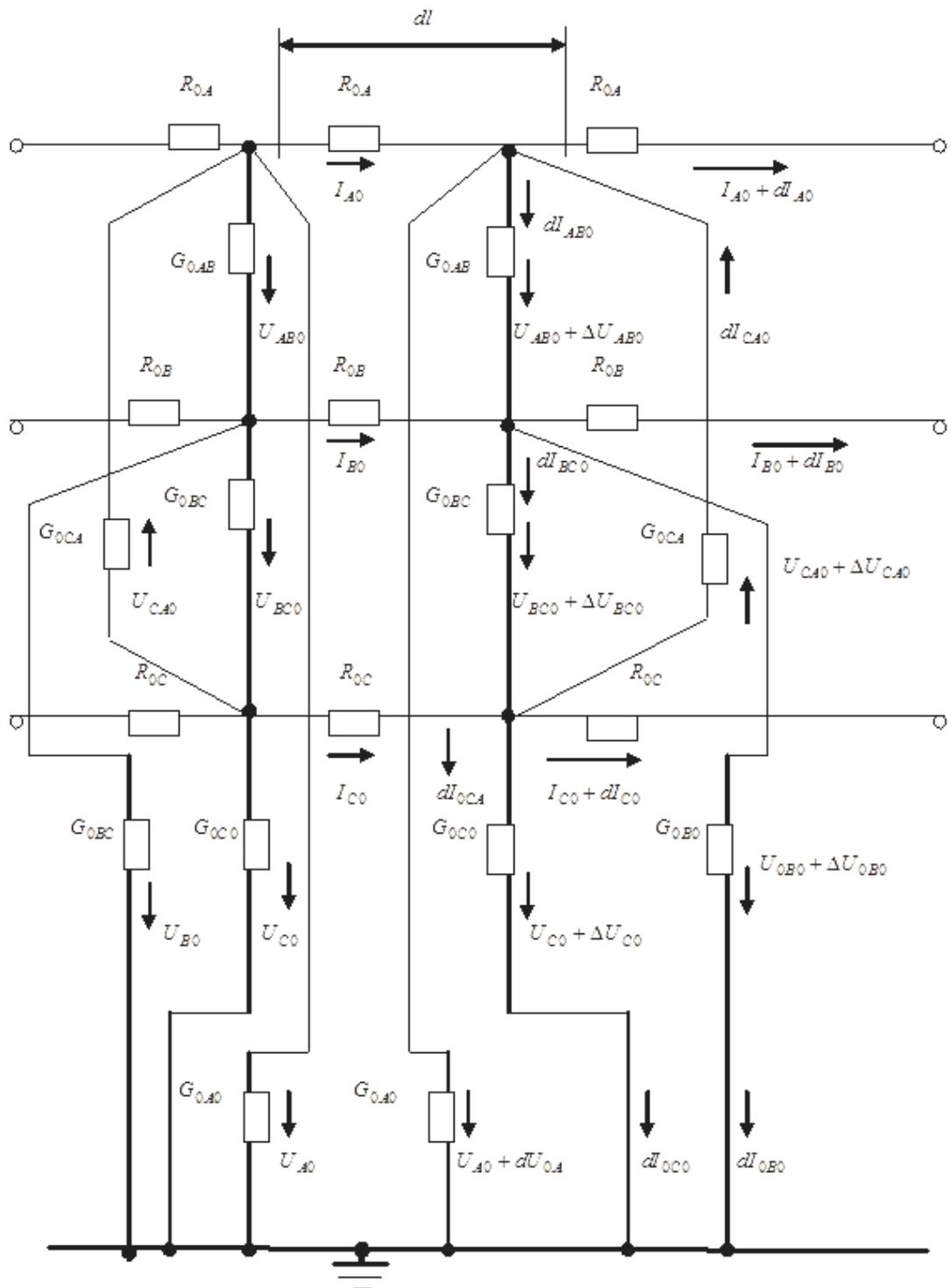


Рис. 1. Расчетная электрическая схема замещения элементарного однородного участка трехфазной ЛЭП трехпроводного исполнения для постоянной составляющей напряжения и тока.

Расчетная электрическая схема замещения установившегося режима однородного участка ЛЭП для постоянных составляющих напряжения и тока имеет ряд особенностей. В случае транспортировки электрической энергии отсутствуют ЭДС самоиндукций и взаимоиндукции. То есть, в этом случае в расчетной схеме замещения не учитываются собственные и взаимные индуктивности.

Кроме того, известно, что емкостные элементы не участвуют в проводимости электрического тока и поэтому тоже отсутствуют в описываемой схеме замещения установившегося режима ЛЭП.

Таким образом, для иллюстрации электромагнитных процессов в анализируемом участке ЛЭП для постоянных составляющих напряжения и тока могут быть использованы лишь резистивные элементы, как это и выполнено при построении расчетной схемы замещения исследуемого объекта, представленной на рис. 1.

Здесь продольные параметры линейных проводов иллюстрируются сопротивлениями R_{0A} , R_{0B} и R_{0C} .

Поперечные параметры, иллюстрирующие электромагнитные связи между линейными проводами, характеризуют электромагнитные связи между проводами и обозначены проводимостями G_{0AB} , G_{0BC} и G_{0CA} . Проводимости G_{0A0} , G_{0B0} и G_{0C0} иллюстрируют поперечные параметры, характеризующие электромагнитные связи между линейными проводами и заземленными контурами ЛЭП. Естественно, речь идет о погонных омических сопротивлениях и погонных омических проводимостях.

На представленной на рис. 1 электрической схеме замещения выделен участок элементарной протяженности dl .

Входные характеристики электрической энергии для выделенного участка ЛЭП на схеме замещения представлены линейными токами I_{A0} , I_{B0} и I_{C0} ; фазными напряжениями U_{A0} , U_{B0} и U_{C0} ; линей-

ными напряжениями U_{AB0} , U_{BC0} и U_{CA0} .

Выходные характеристики электрической энергии, то есть характеристики электрической энергии, в конце выделенного участка получают элементарные приращения:

$$\begin{aligned} I_{A0} + dI_{A0}; & \quad I_{A0} + dI_{A0}; & \quad I_{A0} + dI_{A0}; \\ U_{A0} + dU_{A0}; & \quad U_{B0} + dU_{B0}; & \quad U_{C0} + dU_{C0}; \end{aligned}$$

$$U_{AB0} + dU_{AB0} \quad U_{BC0} + dU_{BC0} \quad U_{CA0} + dU_{CA0}$$

Всего шесть напряжений и три тока. Это означает, что математическая модель анализируемого участка ЛЭП для постоянной составляющей напряжений и токов представляет собой систему девяти уравнений:

$$\begin{aligned} I_{A0} = & \\ = dI_{0A0} + dI_{AB0} - dI_{CA0} + I_{A0} + dI_{A0}; & \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{B0} = & \\ = dI_{0B0} + dI_{BC0} - dI_{AB0} + I_{B0} + dI_{B0}; & \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{C0} = & \\ = dI_{0C0} + dI_{CA0} - dI_{BC0} + I_{C0} + dI_{C0}; & \quad (3) \end{aligned}$$

$$U_{A0} = I_{A0}R_{0A}dl + U_{A0} + dU_{A0}; \quad (4)$$

$$U_{B0} = I_{B0}R_{0B}dl + U_{B0} + dU_{B0}; \quad (5)$$

$$U_{C0} = I_{C0}R_{0C}dl + U_{C0} + dU_{C0}; \quad (6)$$

$$\begin{aligned} U_{AB0} = & \\ = I_{A0}R_{0A}dl - I_{B0}R_{0B}dl + & \quad (7) \\ + U_{AB0} + dU_{AB0} & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_{BC0} = & \\ = I_{B0}R_{0B}dl - I_{C0}R_{0C}dl + & \quad (8) \\ + U_{BC0} + dU_{BC0}; & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_{CA0} = & \\ = I_{C0}R_{0C}dl - I_{A0}R_{0A}dl + & \quad (9) \\ + U_{CA0} + dU_{CA0}. & \end{aligned}$$

Система уравнений (1) – (9) представляет собой математическую модель передачи постоянной составляющей электрической энергии по однородному участку трехфазной ЛЭП трехпроводного исполнения. Причем, здесь используются обычные приращения. Причина этому в изменении

постоянных составляющих напряжения и тока лишь по одной переменной, а именно по протяженности l .

В результате ряда математических преобразований уравнений (1) – (9) получена система трех уравнений второго порядка:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 U_{A0}}{dl^2} &= \\ &= R_{0A} [U_{A0} (G_{0A0} + G_{0AB} + G_{0CA}) - \\ &\quad U_{B0} G_{0AB} - U_{C0} G_{0CA}] - \\ \frac{d^2 U_{B0}}{dl^2} &= \\ &= R_{0B} [U_{B0} (G_{0B0} + G_{0AB} + G_{0BC}) - \\ &\quad - U_{A0} G_{0AB} - U_{C0} G_{0BC}] - \\ \frac{d^2 U_{C0}}{dl^2} &= \\ &= R_{0C} [U_{C0} (G_{0C0} + G_{0CA} + G_{0BC}) - \\ &\quad - U_{A0} G_{0CA} - U_{B0} G_{0BC}] \end{aligned} \right\} (10)$$

Характеристическое уравнение этой системы уравнений имеет вид:

$$x^6 + ax^4 + bx^2 + c = 0, \quad (11)$$

где a , b , c – коэффициенты, численные значения которых представляют собой совокупность продольных и поперечных параметров ЛЭП.

В результате решения характеристического уравнения (11) получены формулы, позволяющие определить постоянные составляющие фазных и линейных напряжений и токов в любом месте анализируемого участка ЛЭП на расстоянии l от его начала:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{A0} &= \\ &= \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 (\dot{U}_{1A0} ch\gamma_{i0} l - \dot{I}_{1A0} Z_{cAi0} sh\gamma_{i0} l); \end{aligned} (12)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{B0} &= \\ &= \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 (\dot{U}_{1B0} ch\gamma_{i0} l - \dot{I}_{1B0} Z_{cBi0} sh\gamma_{i0} l); \end{aligned} (13)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{C0} &= \\ &= \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 (\dot{U}_{1C0} ch\gamma_{i0} l - \dot{I}_{1C0} Z_{cCi0} sh\gamma_{i0} l); \end{aligned} (14)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{AB0} &= \\ &= \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 [(\dot{U}_{1A0} - \dot{U}_{1B0}) ch\gamma_{i0} l - \\ &\quad - (\dot{I}_{1A0} Z_{cAi0} - \dot{I}_{1B0} Z_{cBi0}) sh\gamma_{i0} l]; \end{aligned} (15)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{BC0} &= \\ &= \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 [(\dot{U}_{1B0} - \dot{U}_{1C0}) ch\gamma_{i0} l - \\ &\quad - (\dot{I}_{1B0} Z_{cBi0} - \dot{I}_{1C0} Z_{cCi0}) sh\gamma_{i0} l]; \end{aligned} (16)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{CA0} &= \\ &= \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 [(\dot{U}_{1C0} - \dot{U}_{1A0}) ch\gamma_{i0} l - \\ &\quad - (\dot{I}_{1C0} Z_{cCi0} - \dot{I}_{1A0} Z_{cAi0}) sh\gamma_{i0} l]; \end{aligned} (17)$$

$$\dot{I}_{A0} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \left(\dot{I}_{1A0} ch\gamma_{i0} l - \frac{\dot{U}_{1A0}}{Z_{cAi0}} sh\gamma_{i0} l \right); (18)$$

$$\dot{I}_{B0} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \left(\dot{I}_{1B0} ch\gamma_{i0} l - \frac{\dot{U}_{1B0}}{Z_{cBi0}} sh\gamma_{i0} l \right); (19)$$

$$\dot{I}_{C0} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \left(\dot{I}_{1C0} ch\gamma_{i0} l - \frac{\dot{U}_{1C0}}{Z_{cCi0}} sh\gamma_{i0} l \right), (20)$$

где U_{1A0} , U_{1B0} , U_{1C0} и I_{1A0} , I_{1B0} , I_{1C0} – постоянные составляющие фазных напряжений и линейных токов в начале рассматриваемого участка ЛЭП; Z_{cAi0} , Z_{cBi0} и Z_{cCi0} – волновые сопротивления каждого провода исследуемого участка ЛЭП для i -й пары волн постоянной составляющей электрической энергии; γ_{i0} – постоянная распространения постоянной составляющей энергии i -й пары электромагнитного поля.

Получается, что и постоянные составляющие напряжений и токов по каждому линейному проводу распространяются при посредстве трех пар волн электромагнитного поля. Причем, в каждом линейном проводе ЛЭП каждая пара волн электромагнитного поля имеет собственное волновое сопротивление Z_{cAi0} , Z_{cBi0} и Z_{cCi0} . Здесь отсутствуют взаимные волновые сопротивления, т. к. отсутствует явление взаимной индукции между этими проводами при распространении

по анализируемой ЛЭП электрической энергии постоянного тока.

Пусть продольные параметры исследуемого участка характеризуются следующими величинами:

$$R_{0A} = 0,13 \text{ Ом/км}; R_{0B} = 0,132 \text{ Ом/км};$$

$$R_{0C} = 0,127 \text{ Ом/км}.$$

А поперечные параметры –

$$G_{0A0} = 10^{-12} \text{ См/км}; G_{0B0} = 0,8^{-12} \text{ См/км};$$

$$G_{0C0} = 1,3^{-12} \text{ См/км}; G_{0AB} = 10^{-10} \text{ См/км};$$

$$G_{0BC} = 0,5^{-10} \text{ См/км}; G_{0CA} = 1,3^{-10} \text{ См/км}.$$

Ввиду таких величин поперечных параметров по сравнению с продольными коэффициентами характеристического уравнения (11) оказываются равенствами: $a = 3$; $b = 3$; $c = 1$.

Корни характеристического уравнения оказываются комплексными. Этот факт говорит о том, что процесс распространения постоянной составляющей по проводам однородного участка трехфазной ЛЭП трехпроводного исполнения носит колебательный характер. Постоянные распространения в таком случае имеют комплексные значения:

$$\gamma_{10} = -0,0007 - j0,9988;$$

$$\gamma_{20} = -0,0007 - j1,0011;$$

$$\gamma_{30} = -0,0013 + j.$$

Но тогда и волновые сопротивления для каждой пары волн постоянной составляющей электрической энергии в каждом проводе исследуемого участка ЛЭП тоже оказываются комплексными:

$$Z_{cA10} = (-0,0001 + j0,1301) \text{ Ом};$$

$$Z_{cA20} = (-0,0001 + j0,1299) \text{ Ом};$$

$$Z_{cA30} = (-0,0002 - j0,13) \text{ Ом};$$

$$Z_{cB10} = (-0,0001 + j0,1322) \text{ Ом};$$

$$Z_{cB20} = (-0,0001 + j0,1318) \text{ Ом};$$

$$Z_{cB30} = (-0,0002 - j0,1320) \text{ Ом};$$

$$Z_{cC10} = (-0,0001 + j0,1271) \text{ Ом};$$

$$Z_{cC20} = (-0,0001 + j0,1269) \text{ Ом};$$

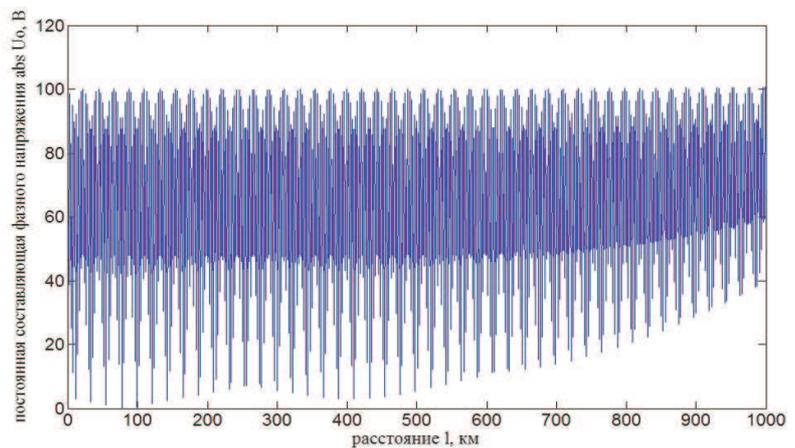
$$Z_{cC30} = (-0,0002 + j0,1270) \text{ Ом}.$$

Малая величина волновых сопротивлений обуславливает резкое увеличение тока в проводах ВЛЭП. Это подтверждается количественными и графическими интерпретациями их результатов.

На рис. 2 и рис. 3 приведены графические интерпретации распределения постоянных составляющих фазного напряжения и линейного тока вдоль однородного участка трехфазной ЛЭП протяженностью 1000 км.

Постоянные составляющие фазного напряжения U_{20} и линейного тока I_{20} приняты при построении графических интерпретаций распределения этих величин вдоль исследуемого участка ЛЭП равными, соответственно, 100 В и 10 А. На рис. 2 и 3 видно, что постоянная составляющая напряжения уменьшается (рис. 2), а постоянная составляющая линейного тока (рис. 3), существенно возрастает, и затем анализируемые величины практически стабилизируются. Хотя на протяжении всего исследуемого участка ЛЭП явно просматриваются максимальные и минимальные экстремальные значения.

Рис. 2. Графическая интерпретация распре-



ления постоянной составляющей фазного напряжения вдоль несимметричного однородного участка трехфазной ЛЭП трехпроводного исполнения протяженностью 1000 км.

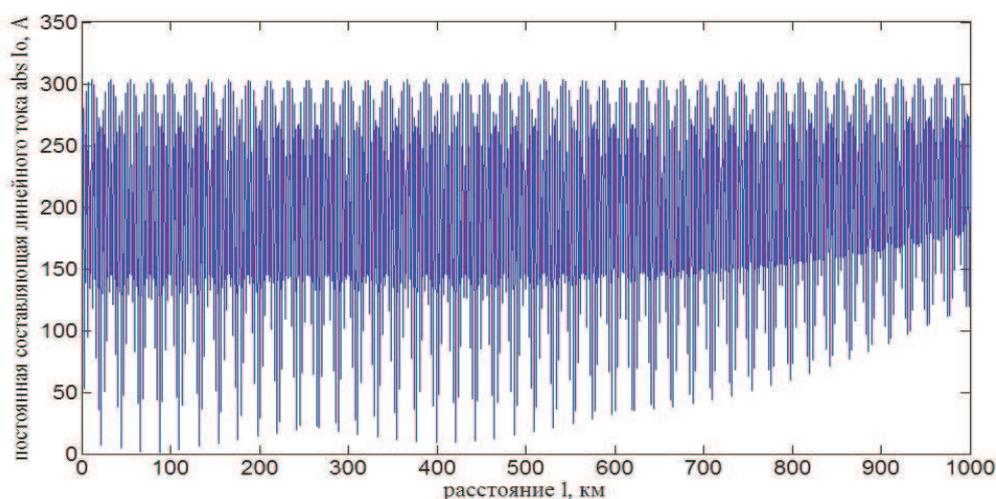


Рис. 3. Графическая интерпретация распределения постоянной составляющей линейного тока вдоль несимметричного однородного участка трехфазной ЛЭП трехпроводного исполнения протяженностью 1000 км

УДК 624.012.3

Г.В. Коваленко, Н.С. Меньщикова*

УЧЕТ ФИЗИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА ПРИ ОЦЕНКЕ ИЗМЕНЕНИЯ ИЗГИБНОЙ ЖЕСТКОСТИ КОНСТРУКЦИЙ СО СМЕШАННЫМ АРМИРОВАНИЕМ

Рассмотрены основные положения математической модели напряженно-деформированного состояния конструкций со смешанным армированием с учетом физической нелинейности железобетона. Произведен анализ изменения изгибной жесткости балок покрытия на всех этапах кратковременного нагружения.

Ключевые слова: деформационная модель, изгибная жесткость, физическая нелинейность, итерация, диаграмма деформирования.

Одним из путей снижения расхода материалов в железобетонных конструкциях является использование точных методов оценки их напряженно-деформированного состояния, в которых учитывались бы такие специфические свойства железобетона, как трещинообразование, анизотропия, пластические деформации бетона и арматуры и их изменение в зависимости от уровня внешней нагрузки и режима нагружения.

Внимание многих исследователей в России и за рубежом обращено на разработку новых и модификацию имеющихся численных методов расчета железобетонных конструкций. Среди множества решаемых при этом вопросов первое место занимает вопрос, связанный с уточнением физической модели железобетона с учетом ряда факторов, оказывающих влияние на его работу в составе конструкции. К ним следует отнести, прежде всего, изменения жесткости нормального сечения

* - автор, с которым следует вести переписку.